

УДК 621.791.754

DOI 10.22213/2410-9304-2018-1-58-66

П. Ю. Петров, кандидат технических наук, доцент
 Филиал ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения
 Императора Александра I» в г. Ярославле

УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ФОРМЫ ВЫПУКЛОСТИ СВАРНОГО ШВА ОТ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ

Работа посвящена проблеме определения математической зависимости влияния параметров технологического процесса на форму получаемого объекта. Непосредственно в статье рассмотрена проблема определения закономерности влияния параметров режима сварки на форму выпуклости сварного шва. Описана методика определения такой зависимости.

В исследовании использовались ранее установленные регрессионные зависимости определения размеров выпуклости сварного шва (ширина шва (e) и высота выпуклости (g)) от параметров режима сварки в углекислом газе. Для этих размеров и рассчитанного значения площади наплавленного металла (F_H) на основе решения уравнений гидростатики определялись показатели формы выпуклости: угол перехода от выпуклости к основному металлу (φ) и капиллярная постоянная (α_k).

Проведен численный эксперимент при варьировании скорости подачи проволоки и напряжении дуги в диапазоне, который соответствует нормативным параметрам сварки и ремонта конструкций и деталей железнодорожного транспорта. Научная новизна заключается в том, что установлены регрессионные зависимости угла перехода от выпуклости к основному металлу (φ) и капиллярной постоянной (α_k) от этих параметров режима сварки.

Представленная в статье методика может быть применена для технологических процессов с образованием статически уравновешенного объема жидкой фазы, например при 3D-печати.

Ключевые слова: выпуклость сварного шва, ширина шва, высота выпуклости, площади наплавленного металла, угол перехода от выпуклости к основному металлу, капиллярная постоянная, режим сварки, железнодорожный транспорт.

Современное развитие машиностроения характеризуется появлением и совершенствованием моделей оценки работоспособности деталей, узлов и изделий в целом с учетом как можно большего количества значимых факторов, оказывающих влияние на эксплуатацию. При проектировании и изготовлении сварных конструкций важным является учет влияния режимов сварки на прочность сварного соединения. Например, для однопроходного стыкового соединения, получаемого при использовании дуговых способов сварки, можно проследить такую цепочку влияния режимов сварки на характеристики сварного соединения: параметры режима сварки \rightarrow геометрия сварного шва \rightarrow прочность сварного соединения.

Характеристики геометрии выпуклости шва можно разделить на две группы (рис. 1):

1) *размеры* выпуклости сварного шва: ширина шва (e), высота выпуклости (g) и площадь поперечного сечения наплавленного металла (F_H);

2) *форма* выпуклости определяется линией поверхности поперечного сечения сварного шва (L) и углом перехода от выпуклости к основному металлу (φ).

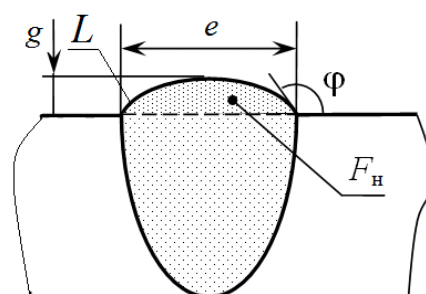


Рис. 1. Параметры геометрии шва

Известны математические зависимости размеров выпуклости шва от параметров режима сварки, например [1–4]. Такие регрессионные зависимости получены с высокими коэффициентами корреляции, поэтому рассчитанные по ним значения размеров выпуклости шва вполне можно принимать в

качестве экспериментальных данных и использовать для проведения численного эксперимента. Однако не известны уравнения расчета величины угла φ в зависимости от параметров режима сварки. Величину этого угла можно получить, используя те или иные способы описания формы выпуклости сварного шва.

Целью работы является установление закономерности изменения геометрии сварного шва и коэффициента капиллярности от параметров режимов сварки стыковых соединений.

«Форма и размеры выпуклости сварного шва, а также плавность перехода от основного металла к наплавленному оказывают существенное влияние на работоспособность сварного соединения. Роль данных факторов особенно велика при изготовлении ответственных конструкций, работающих при переменных и динамических нагрузках. Вопросы формирования стыковых швов и разработки методов расчета их размеров в зависимости от режимов сварки рассмотрены в работах Б. Е. Патона, А. И. Акулова, Г. А. Бельчука, А. А. Ерохина, В. И. Демянцевича, а также других отечественных и зарубежных исследователей. Эти работы показали, что форма и размеры выпуклости сварного шва в значительной мере определяются режимом сварки и теплофизическими характеристиками свариваемого металла. Однако наряду с этими факторами на процесс формирования валика сварного шва оказывают влияние и силы поверхностного натяжения» [5, с. 62]. Следовательно, формирование валика зависит от процессов, протекающих в хвостовой части сварочной ванны, и необходим учет свойств металла шва в жидком состоянии.

Общая методика оценки влияния параметров режима сварки на форму выпуклости шва

В теории сварки разработаны различные модели определения вида и размеров линии L . Одним из методов определения этой линии является применение теории гидростатики [6, 7], которая достаточно точно отражает физические процессы на последнем этапе формирования сварного шва. «Поскольку границы усиления шва фиксируют-

ся в результате кристаллизации, то формирование усиления (наплавленного валика) происходит на базе, равной ширине сварочной ванны e . Поэтому в качестве физической модели процесса формирования усиления шва может быть принята система “жидкий металл – твердая подложка” в методе “большой капли”, используемом для измерения поверхностного натяжения жидких металлов» [8, с. 32–33]. Следовательно, учитывая, что окончательное формирование геометрии выпуклости сварного шва формируется в хвостовой части сварочной ванны, то давлением сварочной дуги, скоростью каплепереноса жидкого металла проволоки в ванну, формой и силой магнитного поля дуги, а также другими процессами и их характеристиками, которые наблюдаются в начале ванны, можно пренебречь.

При использовании уравнений гидростатики для построения линии L необходимо иметь численные значения таких размеров сварного шва, как e и F_n , а также величину капиллярной постоянной (α_k). Если в отношении первых двух параметров известны зависимости их расчета от параметров режима сварки, то не известны зависимости, определяющие влияние режима сварки на значение капиллярной постоянной. Таким образом, отсутствует возможность корректного определения влияния параметров режима сварки на комплекс показателей геометрии сварного шва и далее на прочность сварного соединения.

Линия выпуклости шва (L) по гидростатической модели описывается системой из трех уравнений, в которые входит шесть переменных. Зная любые три из них, можно получить остальные три. Например, имея значения геометрических размеров выпуклости шва (e , g и F_n), можно рассчитать значения угла контакта, параметра кривизны профиля поверхности шва (z_0) и капиллярной постоянной (α_k). Угол контакта (внутренний угол между линией поверхности выпуклости шва и горизонтальной осью) является смежным с углом φ .

Значение площади выпуклости сварного шва для автоматической и полуавтоматической сварки при нулевом зазоре можно рассчитать по известной формуле [9, с. 46]:

$$F_n = \frac{\pi \cdot d_3^2 \cdot V_{п.пр}}{4 \cdot V_{св}} \cdot \left(1 - \frac{\Psi}{100}\right), \quad (1)$$

где d_3 – диаметр проволоки (электрода); $V_{п.пр}$ – скорость подачи проволоки / электрода; $V_{св}$ – скорость сварки; Ψ – коэффициент, учитывающий потери металла на угар и разбрызгивание.

Поскольку можно рассчитать размеры выпуклости шва (e , g , F_n) по параметрам режима сварки, то с учетом применения математических моделей теории гидростатики существует методическая возможность определения формы выпуклости шва в зависимости от параметров режима сварки в два этапа по определенным исходным данным, в соответствии со следующим алгоритмом:

$$\begin{aligned} \{V_{п.пр}, U_d, V_{св}, d_3\} &\rightarrow \{e, g\}; \\ \{V_{п.пр}, U_d, d_3\} &\rightarrow \Psi; \\ \{V_{п.пр}, V_{св}, d_3, \Psi\} &\rightarrow F_n; \\ \{e, g, F_n\} &\rightarrow \{\varphi, z_0, \alpha_k\}; \end{aligned} \quad (2)$$

или обобщенно

$$\{V_{п.пр}, U_d, V_{св}, d_3\} \rightarrow \{e, g, F_n\} \rightarrow \{\varphi, z_0, \alpha_k\}.$$

исходные данные 1-й этап 2-й этап

Таким образом, для использования представленного алгоритма необходимо иметь массив исходных данных параметров режима сварки и массив геометрических размеров выпуклости сварного шва, значения которого определенным образом связаны с элементами исходного массива. Такому требованию, в частности, соответствуют результаты исследования, приведенные в работах [10] и [11]. Однако поскольку модель расчета размеров выпуклости шва, содержащаяся в работе [12], не получила подтверждения в результате верификации, то далее будет использоваться модель такого расчета, приведенная в работе [13].

Пример расчета формы выпуклости шва

В качестве примера рассмотрим режимы, которые применяются при сварке вагонов. Полуавтоматическая сварка в углекислом газе является достаточно технологичной и экономически эффективной, поэтому она широко используется при изготовлении и

ремонте деталей и узлов подвижного состава. Нормативными документами по ремонту и сварке вагонов, в частности, определено: «Для ремонта литых деталей, рам и кузовов сваркой должны применяться проволока марки Св-08Г2С диаметром 1,2–1,6 мм и двуокись углерода» [14, с. 30]. В стандарте ОАО «Российские железные дороги» СТО РЖД 13.003–2012 указаны следующие режимы сварки конструкций из углеродистых и низколегированных сталей (положение сварки – нижнее) в двуокиси углерода (δ – толщина металла, глубина разделки, $I_{св}$ – сила сварочного тока):

$$\begin{aligned} \delta = 1,0 - 1,5 \text{ мм}, d_3 = 0,8 \text{ мм}, I_{св} = 70 \dots 120 \text{ А}, \\ U_d = 18 \dots 21 \text{ В}; \\ \delta = 1,5 - 3,0 \text{ мм}, d_3 = 1,0 \text{ мм}, I_{св} = 100 \dots 180 \text{ А}, \\ U_d = 18 \dots 24 \text{ В}; \\ \delta = 3,0 - 4,0 \text{ мм}, d_3 = 1,2 \text{ мм}, I_{св} = 140 \dots 250 \text{ А}, \\ U_d = 20 \dots 26 \text{ В}; \\ \delta = 3,5 - 5,0 \text{ мм}, d_3 = 1,4 \text{ мм}, I_{св} = 180 \dots 310 \text{ А}, \\ U_d = 22 \dots 28 \text{ В}; \\ \delta \text{ свыше } 4,0 \text{ мм}, d_3 = 1,6 \text{ мм}, I_{св} = 200 \dots 360 \text{ А}, \\ U_d = 26 \dots 33 \text{ В} \end{aligned} \quad [15, \text{ с. } 23].$$

Значения скорости сварки и скорости подачи проволоки этим стандартом не определены.

В исследованиях, описанных в статье [16], для сварки в углекислом газе в нижнем положении встык в соответствии с ГОСТ 14771–76 указаны следующие варьируемые параметры: $V_{п.пр} = 150 \dots 450$ м/ч; $U_d = 18 \dots 33$ В; $V_{св.п} = 10 \dots 60$ м/ч; $d_3 = 1,0 \dots 1,6$ мм; $\delta = 3 \dots 12$ мм, ширина зазора: $b = 0 \dots 2$ мм. При этом коэффициент, учитывающий потери металла на угар и разбрызгивание, составлял 10–12 %. Следовательно, отсутствует зависимость этого коэффициента от параметров режима сварки, в дальнейших исследованиях он принимался равным среднему значению – 11 %.

Сравнивая два массива параметров режима сварки (определенный СТО РЖД 13.003–2012 и приведенный в табл. 1), несложно видеть, что по величинам толщины металла «отсеиваются» первые два набора параметров режима сварки, по величинам диаметра проволоки наблюдается совпадение. Значения напряжений на дуге, приведенных в СТО РЖД 13.003–2012, полностью вкладываются в диапазон изменения напряжений

приведенных в работе [17]. Для сопоставления двух параметров режима сварки по величине силы сварочного тока воспользуемся следующим уравнением [18, с. 211]:

$$I_{\text{св}} = -134 + 14,42\delta + 311,25d_3 + 8,22\delta b + 40,25\delta d_3 - 109,59bd_3 - 3,04\delta^2 - 148,37d_3^2. \quad (3)$$

Принимая здесь и далее ширину зазора равной нулю мм, получим:

$$\delta = 3,0 \text{ мм} \rightarrow d_3 = 1,2 \text{ мм} \rightarrow I_{\text{св}} = 187 \text{ А};$$

$$\delta = 4,0 \text{ мм} \rightarrow d_3 = 1,2 \text{ мм} \rightarrow I_{\text{св}} = 228 \text{ А};$$

$$\delta = 4,0 \text{ мм} \rightarrow d_3 = 1,4 \text{ мм} \rightarrow I_{\text{св}} = 245 \text{ А};$$

$$\delta = 5,0 \text{ мм} \rightarrow d_3 = 1,4 \text{ мм} \rightarrow I_{\text{св}} = 289 \text{ А};$$

$$e = \exp\left[-3,0 + 0,121U_{\text{д}} - 0,034V_{\text{св}} + 3,33d_3 - 0,00166U_{\text{д}}V_{\text{св}} + 0,0136V_{\text{св}}d_3 + 0,000427V_{\text{св}}^2 - 0,956d_3^2 + 1,0 \cdot 10^{-3}V_{\text{п.пр}}(7 + 0,022V_{\text{св}} - 2,8d_3 - 0,00561V_{\text{п.пр}})\right], \quad (4)$$

$$R = 0,96, \sigma_0 = 0,84,$$

$$g/e = \exp\left[4,8 - 0,215U_{\text{д}} + 0,014V_{\text{св}} - 2,87d_3 + 0,0025U_{\text{д}}V_{\text{св}} - 0,02V_{\text{св}}d_3 - 0,000402V_{\text{св}}^2 + 0,918d_3^2 + 1,0 \cdot 10^{-3}V_{\text{п.пр}}(7,14 - 0,0404V_{\text{св}} + 6,15d_3 + 0,0048V_{\text{п.пр}})\right], \quad (5)$$

$$R = 0,79, \sigma_0 = 0,05,$$

где R – коэффициент множественной корреляции; σ_0 – остаточные отклонения.

Зная границы варьирования параметров режима сварки и уравнения зависимости размеров выпуклости шва от этих параметров, можно осуществить планирование и провести численный эксперимент. В эксперименте ряд параметров принимались постоянными ($V_{\text{св}} = 25$ м/ч, $b = 0$ мм, $\delta = 3,0$ мм, $d_3 = 1,2$ мм, $\psi = 11$ %), а варьируемыми факторами являлись напряжение дуги и скорость подачи проволоки. Для каждого из этих факторов, с учетом рекомендаций СТО РЖД 13.003–2012, были приняты четыре значения, а именно: $U_{\text{д1}} = 20$ В, $U_{\text{д2}} = 22$ В,

$$\delta = 5,0 \text{ мм} \rightarrow d_3 = 1,6 \text{ мм} \rightarrow I_{\text{св}} = 302 \text{ А};$$

$$\delta = 6,0 \text{ мм} \rightarrow d_3 = 1,6 \text{ мм} \rightarrow I_{\text{св}} = 345 \text{ А}.$$

Учитывая совпадения диапазонов варьирования также и по силе сварочного тока, можно сделать заключение о допустимости использования регрессионных уравнений, приведенных в статье [19], для моделирования формы и размеров выпуклости сварного шва при сварке (ремонте) конструкций железнодорожного транспорта сваркой в CO_2 .

«Регрессионные уравнения зависимости качественных характеристик сварки CO_2 и параметров режима сварки» следующие [20, с. 210]:

$U_{\text{д3}} = 24$ В, $U_{\text{д4}} = 26$ В и $V_{\text{п.пр1}} = 150$ м/ч, $V_{\text{п.пр2}} = 250$ м/ч, $V_{\text{п.пр3}} = 350$ м/ч, $V_{\text{п.пр4}} = 450$ м/ч. По регрессионным зависимостям (4) и (5) рассчитывались линейные размеры выпуклости шва и по уравнению (1) – площадь выпуклости (первый этап расчета), их значения представлены в табл. 1.

Отметим, что для всех значений скорости подачи проволоки с увеличением напряжения на дуге ширина шва увеличивается, при этом ее размер при $U_{\text{д4}} = 26$ В в 1,6 раза больше, чем при $U_{\text{д1}} = 20$ В, высота выпуклости шва уменьшается в 1,55 раза, а площадь поперечного сечения наплавленного металла остается неизменной.

Таблица 1. Значения линейных размеров выпуклости шва (e и g) и площади выпуклости сварного шва ($F_{\text{н}}$)

Напряжение на дуге, В	Скорость подачи проволоки, м/ч											
	150, м/ч			250, м/ч			350, м/ч			450, м/ч		
	e , мм	g , мм	$F_{\text{н}}$, мм ²	e , мм	g , мм	$F_{\text{н}}$, мм ²	e , мм	g , мм	$F_{\text{н}}$, мм ²	e , мм	g , мм	$F_{\text{н}}$, мм ²
20	4,65	1,93	6,0	5,65	2,63	10,1	6,13	3,52	14,1	5,95	4,65	18,1
22	5,45	1,66	6,0	6,62	2,27	10,1	7,19	3,04	14,1	6,98	4,01	18,1
24	6,39	1,44	6,0	7,76	1,96	10,1	8,43	2,63	14,1	8,18	3,47	18,1
26	7,49	1,24	6,0	9,10	1,69	10,1	9,88	2,27	14,1	9,59	3,00	18,1

Пропорциональные изменения наблюдаются и для всех значений напряжений при сравнении значений при $V_{п.пр4} = 450$ м/ч со значениями при $V_{п.пр4} = 150$ м/ч: с увеличением скорости подачи проволоки ширина шва увеличивается в 1,28 раза, высота выпуклости уменьшается в 2,4 раза и площадь поперечного сечения наплавленного металла увеличивается в 3,0 раза.

Поскольку данные в таблице рассчитаны по регрессионным зависимостям, которые имеют высокие значения коэффициента корреляции, то они использованы в качестве экспериментальных данных по определе-

нию значений параметров, характеризующих форму линии выпуклости шва L (второй этап расчета). Определение этих параметров (см. табл. 2) осуществлялось при решении системы трех уравнений гидростатики [21, с. 31]:

$$\begin{cases} e = 2\alpha_k^2 \int_0^\varphi \frac{\cos \varphi}{\sqrt{z_0^2 + 2\alpha_k^2(1 - \cos \varphi)}} d\varphi; \\ F_H = e(g + z_0) - 2\alpha_k^2 \sin \varphi; \\ g = \sqrt{z_0^2 + 2\alpha_k^2(1 - \cos \varphi)} - z_0. \end{cases} \quad (6)$$

Таблица 2. Значения угла перехода от выпуклости шва к основному металлу (φ), параметра кривизны профиля поверхности шва (z_0) и капиллярной постоянной межфазной поверхности (α_k) в зависимости от двух факторов параметра режима сварки в CO_2

Напряже- ние на дуге, В	Скорость подачи проволоки, м/ч											
	150, м/ч			250, м/ч			350, м/ч			450, м/ч		
	$\varphi, ^\circ$	$z_0, \text{мм}$	$\alpha_k, \text{мм}$	$\varphi, ^\circ$	$z_0, \text{мм}$	$\alpha_k, \text{мм}$	$\varphi, ^\circ$	$z_0, \text{мм}$	$\alpha_k, \text{мм}$	$\varphi, ^\circ$	$z_0, \text{мм}$	$\alpha_k, \text{мм}$
20	68,2	-0,20	1,04	60,5	-0,29	1,34	53,8	-0,47	1,69	38,4	-0,74	2,03
22	88,6	-0,15	1,05	80,6	-0,21	1,34	72,9	-0,35	1,66	54,8	-0,54	1,93
24	108,4	-0,12	1,12	101,0	-0,16	1,41	93,1	-0,27	1,70	73,9	-0,41	1,90
26	125,7	-0,10	1,25	119,4	-0,13	1,54	112,2	-0,22	1,83	94,0	-0,31	1,95

Как следует из данных, приведенных в последней таблице, значения и φ , и α_k изменяются в значительном интервале: от 38,4 до 125,7° и от 1,036 до 2,029 мм соответственно, что характеризует изменение вида линии L . В данном численном эксперименте наблюдаются два типа формы выпуклости сварного шва. Тип № 1 существует при $\varphi \leq 90^\circ$ и соответствует модели капли на поверхности с плохой смачиваемостью, а тип № 2 – при $\varphi > 90^\circ$ – с хорошей. В рассматриваемом диапазоне варьирования скорости подачи проволоки и напряжения дуги количество типов форм выпуклости практически равно 9 и 7 соответственно.

На изменение типа формы значительное влияние оказывает напряжение на дуге (в основном при переходе от $U_{д2} = 22$ В к $U_{д3} = 24$ В), а изменение скорости подачи проволоки такого влияния не оказывает, что наглядно показано на следующих рисунках. На рис. 2 и 3 представлено изменение формы выпуклости сварного шва при изменении напряжения дуги при фиксированной скорости подачи проволоки ($V_{п.пр2} = 250$ м/ч) и при из-

менении скорости подачи проволоки при фиксированном напряжении дуги ($U_{д3} = 24$ В).

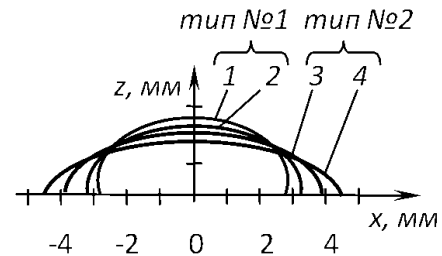


Рис. 2. Изменение формы выпуклости шва при увеличении напряжения на дуге, $V_{п.пр2} = 250$ м/ч: 1) $U_{д1} = 20$ В, 2) $U_{д2} = 22$ В, 3) $U_{д3} = 24$ В, 4) $U_{д4} = 26$ В

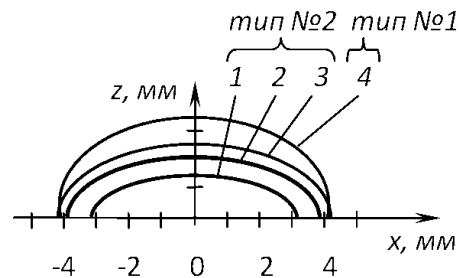


Рис. 3. Изменение формы выпуклости шва при увеличении скорости подачи проволоки, $U_{д3} = 24$ В: 1) $V_{п.пр1} = 150$ м/ч, 2) $V_{п.пр2} = 250$ м/ч, 3) $V_{п.пр3} = 350$ м/ч, 4) $V_{п.пр4} = 450$ м/ч

Как было показано, важным параметром, характеризующим форму выпуклости сварного шва, задающим граничные условия ориентации в пространстве линии L , является угол φ . Изменение значений угла перехода от выпуклости к основному металлу от варьируемых в эксперименте факторов показано на рис. 4, *а*. Несложно видеть, что угол перехода от выпуклости к основному металлу зависит от напряжения дуги линейно, а от скорости подачи проволоки – плавно уменьшается. Такую закономерность для исследуемого диапазона варьируемых факторов можно описать зависимостью (коэффициент корреляции $R = 0,996$):

$$\varphi_k = -89,13 - 0,161V_{п.пр} + 10,29U_d - 168,9 \frac{U_d}{V_{п.пр}} \quad (7)$$

Закономерность изменения капиллярной постоянной межфазной поверхности от варьируемых параметров режима сварки представлена на рис. 4, *б*. Очевидно, что и от напряжения на дуге, и от скорости подачи проволоки зависимость изменения капиллярной постоянной носит практически линейный характер, что может быть описано следующим регрессионным уравнением ($R = 0,993$):

$$\alpha_k = -0,97 - 1,21 \cdot 10^{-3} V_{п.пр} + 0,0727 U_d + 0,0919 \frac{V_{п.пр}}{U_d} \quad (8)$$

Рассчитывая коэффициент капиллярности, фактически решалась обратная задача. При изучении сварочных процессов часто применяют методы решения обратных задач. Например, по данным распределения температурного поля определяют значение эффективной (полезной) мощности источника тепла. Применяемая здесь методика относится к обратным коэффициентным задачам, когда для известной математической модели устанавливают значение входящего в него коэффициента (-ов), который приводит в соответствие исходные данные и результаты расчета по этой модели.

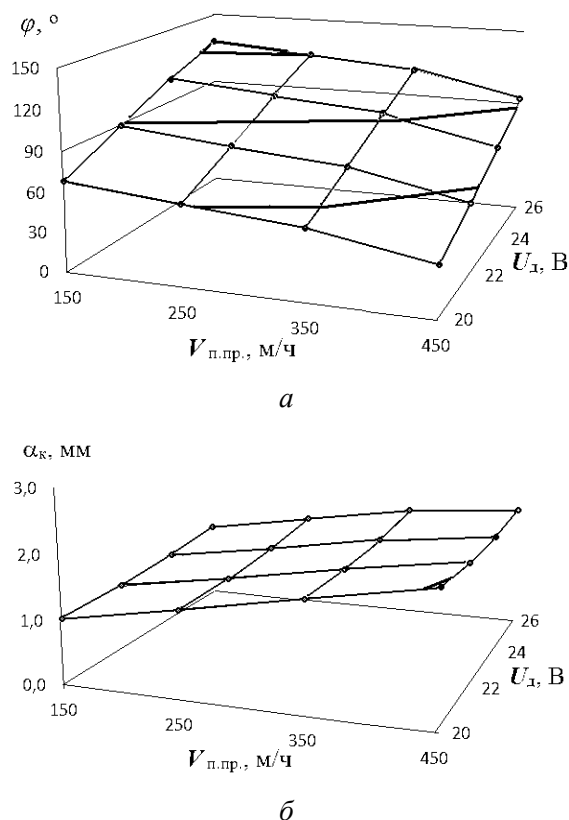


Рис. 4. Графики зависимости от напряжения на дуге и скорости сварки: *а* – угла φ ; *б* – постоянной α_k

Обращает на себя внимание, что значения капиллярной постоянной гораздо меньше тех данных, которые содержатся в литературе. Для конструкционных сталей значение α_k по справочным данным установить не удалось. В технической литературе используются следующие значения капиллярной постоянной: для железа $\alpha_k = 6,1$ мм [22, с. 95], для углеродистой стали $\alpha_k = 5,8$ мм [23, с. 23]. Таким образом, в расчетах по определению формы шва для указанного диапазона режимов сварки необходимо брать значение капиллярной постоянной как минимум в три раза меньше, чем это указано в литературе.

Представленные закономерности получены для сварки в CO_2 , и однозначно переносить их на иные дуговые виды сварки некорректно, т. к. при разных способах сварки может проявляться влияние шлакообразования на капиллярные явления, в частности, при сварке под флюсом или ручной дуговой сварке. Для этих способов сварки по представленной методике также можно определить зависимости коэффици-

ента капиллярности от параметров режима сварки.

Следующими этапами расчетов может стать расчет коэффициента концентрации напряжений у вершины угла перехода от выпуклости шва к основному металлу при разных формах и размерах выпуклости сварного шва и определение оптимального сочетания параметров режима сварки, обеспечивающего высокий уровень прочности сварного соединения. Отдельной задачей может стать анализ факторов, обуславливающих изменения коэффициента капиллярной постоянной от различных параметров режима сварки.

Выводы

1. Предложен алгоритм определения влияния параметров режима сварки на размеры и форму выпуклости шва на основе использования теории и уравнений гидростатики. Применение алгоритма показано применительно к режимам сварки, регламентированным СТО РЖД 13.003–2012.

2. Предложено форму выпуклости шва описывать кривыми двух типов: тип № 1 существует при $\varphi \leq 90^\circ$, а тип № 2 – при $\varphi > 90^\circ$. Установлено, что изменение формы выпуклости шва с типа № 1 на тип № 2 происходит при уменьшении скорости сварки и увеличении напряжения на дуге. Причиной этому является увеличение ширины шва и уменьшение высоты шва при увеличении напряжения на дуге.

3. Установлены зависимости изменения угла перехода от выпуклости сварного шва к основному металлу и капиллярной постоянной от варьируемых параметров режима сварки (скорость подачи проволоки и напряжение на дуге).

4. Показано, что рассчитанные при решении обратной задачи значения капиллярной постоянной межфазной поверхности имеют значительный интервал варьирования, причем они в 3–6 раз меньше, чем это приведено в литературе.

Библиографические ссылки

1. Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г. Оптимизация режима сварки в CO_2 // Автоматическая сварка. 1980. № 12. С. 30–34.

2. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209–218.

3. Лежнева Н. В. Зависимость размеров угловых швов от параметров режима сварки под слоем флюса // Вопросы сварочного производства. Челябинск: Челябинский политехн. институт, 1987. С. 155–160.

4. Лебедев В. С. Разработка технологии импульсной аргонодуговой сварки стыковых швов трубных заготовок из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.02.10. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 18 с.

5. Пацкевич И. Р., Рябов В. Р., Деев Г. Ф. Поверхностные явления при сварке металлов / отв. ред. Д. М. Рабкин; АН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. К.: Наук. думка, 1991. 240 с.

6. Березовский Б. М., Стихин В. А. Влияние сил поверхностного натяжения на формирование усиления стыкового шва // Сварочное производство. 1977. № 1. С. 51–53.

7. Березовский Б. М. Смачивание и растекание сварочной ванны на поверхности металла // Автоматическая сварка. 1983. № 10 (367). С. 31–34.

8. Там же.

9. Коринец И. Ф., Чжень Чун Цзи. Детерминированно-статистическая модель формы шва при дуговой сварке // Автоматическая сварка. 2001. № 10. С. 44–49.

10. Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г. Оптимизация режима сварки в CO_2 // Автоматическая сварка. 1980. № 12. С. 30–34.

11. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209–218.

12. Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г. Оптимизация режима сварки в CO_2 // Автоматическая сварка. 1980. № 12. С. 30–34.

13. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209–218.

14. Инструкция по сварке и наплавке при ремонте грузовых вагонов. М.: ТРАНСИНФО, 2009. 176 с.

15. Стандарт ОАО «Российские железные дороги» СТО РЖД 13.003–2012 «Общие требо-

вания к сварочным и наплавочным работам при ремонте подвижного состава», утвержден Распоряжением ОАО «РЖД» от 03.12.2012 № 2437р. Екатеринбург: ИД «УралЮрИздат», 2013. 76 с.

16. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209-218.

17. Ibid.

18. Ibid., p. 211.

19. Ibid.

20. Ibid., p. 210.

21. Березовский Б. М. Смачивание и растекание сварочной ванны на поверхности металла // Автоматическая сварка. 1983. № 10 (367). С. 31–34.

22. Пацкевич И. Р., Рябов В. Р., Деев Г. Ф. Поверхностные явления при сварке металлов / отв. ред. Д. М. Рабкин ; АН Украины. Ин-т электросварки им. Е. О. Патона. К. : Наук. думка, 1991. 240 с.

23. Панков В. В., Панков С. В., Богородский И. Г., Букин В. М. Мера формы сварного шва как основа разработки цифровых технологий оценки качества сварных швов // Журнал нефтегазового строительства. 2015. № 2. С. 20–26.

References

1. Dubovetskii S. V., Sergackij G. I., Kasatkin O. G. (1980). *Avtomaticheskaya svarka*. [Automatic welding], no. 12, pp. 30-34. (in Russ).

2. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209-218.

3. Lezhneva N. V. (1987) *Voprosy svarochnogo proizvodstva*. [Questions of welding production], pp. 155-160 (in Russ).

4. Lebedev V. S. (2015) *Razrabotka tekhnologii impul'snoj argonodugovoj svarki stykovykh shvov trubnykh zagotovok iz vysokoprochnogo chuguna s sharovidnym grafitom*. [Development of technology for pulsed argon arc welding of butt joints of pipe billets made of high-strength cast iron with spherical graphite] (PhD thesis), Moscow (in Russ).

5. Pachevich I. R., Ryabov V. R., Deev G. F. (1991) *Poverhnostnye yavleniya pri svarke metallov* [Surface phenomena in welding of metals]. Kiev: Naukova dumka. (in Russ).

6. Berezovskii B. M., Stikhin V. A. (1977). *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding production], no. 1, pp. 51-53. (in Russ).

7. Berezovskii B. M. (1983). *Avtomaticheskaya svarka*. [Automatic welding], no. 10 (367), pp. 31-34 (in Russ).

8. Ibid.

9. Korinets I. F., CHun Czi CHzen' (2001). *Avtomaticheskaya svarka*. [Automatic welding]. no 10. pp. 44-49. (in Russ).

10. Dubovetskii S. V., Sergackij G. I., Kasatkin O. G. (1980). *Avtomaticheskaya svarka*. [Automatic welding], no. 12, pp. 30-34. (in Russ).

11. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209-218.

12. Dubovetskii S. V., Sergackij G. I., Kasatkin O. G. (1980). *Avtomaticheskaya svarka*. [Automatic welding], no. 12, pp. 30-34. (in Russ).

13. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209-218.

14. *Instrukciya po svarke i naplavke pri remonte gruzovykh vagonov*. [Instructions for welding and surfacing in the repair of freight cars]. Moscow, TRANSINFO, 2009.

15. *Obshchie trebovaniya k svarochnym i naplavochnym rabotam pri remonte podvizhnogo sastava, STO RZHD 13.003-2012*. [General requirements for welding and surfacing works in the repair of rolling stock. Standard of JSC "Russian Railways"]. Ekaterinburg, UralYUrIzdat, 2013.

16. Dubovetskii S. V. The application of statistical models of weld formation to the design and control of automatic arc welding conditions // Advanced Welding System, Session IV, November, pp. 209-218.

17. Ibid.

18. Ibid., p. 211.

19. Ibid.

20. Ibid., p. 210.

21. Berezovskii B. M. (1983). *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding], no. 10 (367), pp. 31-34 (in Russ).

22. Pachevich I. R., Ryabov V. R., Deev G. F. (1991) *Poverhnostnye yavleniya pri svarke metallov* [Surface phenomena in welding of metals]. Kiev: Naukova dumka, p. 95 (in Russ).

23. Pankov V. V., Pankov S. V., Bogorodskij I. G., Bukin V. M. (2015). *ZHurnal neftegazovogo stroitel'stva*. [Journal of oil and gas construction], no 2, pp. 20-26. (in Russ).

P. Yu. Petrov, PhD in Engineering, Associate Professor, leading engineer, Yaroslavl branch of Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University

The Identification of Dependence of Weld Convexity Form on Parameters of Welding Conditions

The problem of determining the mathematical dependence of the influence of process parameters on the resulting object form is considered in this publication. The determination of the regularity of the influence of welding conditions on the weld bulge form is presented. The method of determination of such dependence is described.

The study used the previously established regression dependence of determining the size of the weld bulge on the parameters of the MIG regime. The weld bulge is described by the weld width (e) and the bulge height (g). The area of the deposited metal (F_n) was also calculated. For these variables, the hydrostatic equation was solved. As a result, the indices of the bulge shape were determined: the angle of transition from bulge to the base metal (φ) and capillary constant (α_c).

A numerical experiment with varying wire feed rate and arc voltage is carried out. The range of variation corresponds to the regulatory parameters of welding and repair of structures and parts of railway transport. Regression dependences of the transition angle from the bulge to the base metal (φ) and capillary constant (α_c) on these parameters of the welding mode are established.

The technique presented in the paper can be applied to technological processes with the formation of statically balanced volume of the liquid phase, for example, in 3D printing.

Keywords: weld convexity, weld width, height of the convexity, area of deposited metal, angle of transition from bulge to base metal, capillary constant, railway transport.

Получено: 12.03.18