



ДЕТЕРМИНИРОВАННО-СТАТИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМЫ ШВА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

И. Ф. КОРИНЕЦ, канд. техн. наук, ЦЗИ ЧЖЕНЬ ЧУН, магистр (НТУУ «Киевский политехнический институт»)

Приведено теоретическое обоснование целесообразности построения детерминированно-статистических моделей в виде произведения степенных функций. На примере дуговой сварки в углекислом газе проверена адекватность разработанных математических моделей, сочетающих преимущества детерминированных (отражение физических процессов и универсальность) и статистических (простота и высокая точность) моделей. Показана область применения моделей.

Ключевые слова: дуговая сварка, математическое моделирование, форма шва, размеры шва, детерминированная модель, статистическая модель

Дуговая сварка несмотря на ее сложность доминирует в сварочном производстве. Этот процесс сварки является предметом многих автоматизированных систем проектирования сварных соединений и технологий, управления технологическими процессами и робототехническими комплексами, диагностики качества, научных исследований и обучения. Эта сфера деятельности немаловажна без применения компьютерной техники и необходимого для нее математического и программного обеспечения [1]. Отсюда потребность в математическом моделировании постоянно возрастает.

К настоящему времени уже накоплен опыт моделирования различных процессов дуговой сварки, в частности формирования шва, о чем свидетельствуют многочисленные публикации. Поэтому целью работы является выбор прототипа модели формы шва для дуговой сварки и разработка метода математического моделирования, который в дальнейшем можно использовать в системе технологической адаптации робота. Эта модель должна быть простой, чтобы обеспечивать работу системы управления в режиме реального времени, а также достаточно чувствительной к технологическим возмущениям (отклонению зазора и геометрии кромок, деформации кромок в процессе сварки и пр.).

Анализ моделей формирования шва. Конечным результатом процесса дуговой сварки является шов, качество которого прежде всего определяется формой (коэффициентами формы проплавления ψ_{II} и валика $\psi_{В}$) и размерами его поперечного сечения (глубиной h и шириной e проплавления, высотой валика g) (рис. 1). Модель должна устанавливать зависимости этих параметров шва от режима дуговой сварки (диаметра электрода d , сварочного тока I , напряжения сварки U , скорости сварки v и плавления проволоки v_{II} и др.).

Все математические описания разделяют на два вида — детерминированные и статистические [2]. Наиболее универсальным является детерминированное описание, которое базируется на основе фундаментальных законов.

Широкоизвестная детерминированная модель проплавления свариваемого металла (Н. Н. Рыкалина) разработана на основе теории тепловых процессов при сварке [3]. Она позволяет рассчитать площадь проплавления и дает удовлетворительную точность с поправочными коэффициентами [4]. Форма и размеры проплавления по этой модели не соответствуют реальному процессу и расчет имеет большие погрешности.

Нелинейный характер процесса теплопроводности и зависимость свойств металла от температуры не всегда позволяют получить простые аналитические решения. Однако современная компьютерная техника позволяет выполнить более точные расчеты формы шва на сложных детерминированных математических моделях, которые построены на системе дифференциальных уравнений и решаются численными методами [5, 6]. Взаимосвязанность одновременно протекающих процессов различной физической природы при дуговой сварке вынуждает исследователей разделять модель на ряд частных моделей и решать более простые задачи.

Так, в работе [7] представлена детерминированная модель формирования поверхности кратера и шва при дуговой сварке, построенная на основе баланса сил поверхностного натяжения, тяжести и механического давления дуги. Однако основные параметры шва (h , e , g) не определяются, а являются входными параметрами этой модели.

В работах [8, 9] предложена относительно простая детерминированная модель формирования формы шва при дуговой сварке в углекислом газе, в которой учитывается баланс сил давления дуги и металлостатического давления жидкого металла ванны, а площадь проплавления определяется на основе упомянутой ранее работы [3]. Эта модель

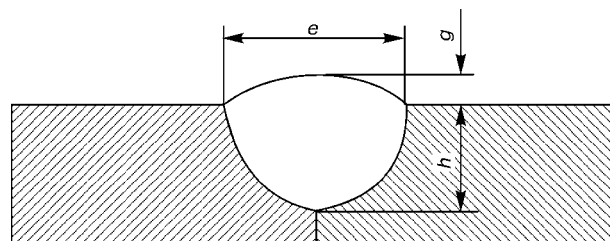


Рис. 1. Параметры стыкового шва



дает зависимость размеров шва не от отдельных параметров режима сварки, а от комплексного параметра — погонной энергии сварки

$$q_{\text{п}} = IU/v. \quad (1)$$

Известно [4], что при одном и том же значении погонной энергии размеры шва могут существенно изменяться. Поэтому по этой модели не представляется возможным с высокой точностью оценить значимость отдельных параметров сварки. Хорошая сходимость расчетных и экспериментальных данных имеет место в узком диапазоне скоростей сварки.

При использовании сложных детерминированных моделей чем больше и точнее учитываются входные параметры, тем больше машинного времени требуется для расчета формы шва и ее оптимизации, что ограничивает их применение в адаптивных системах управления дуговой сваркой.

В последние годы нашли широкое применение статистические модели формы шва, в систематизированном виде представленные в работе [10]. Эти модели охватывают все основные способы дуговой сварки: покрытыми электродами [11], сварки и наплавки под флюсом [12–16], в защитных газах плавящимся [17–19] и неплавящимся [20, 21] электродами различных сталей и цветных металлов. В этих моделях применены математические зависимости в форме полиномов [11, 13–15, 17–19], произведения степеней [12, 20, 21] и смешанного вида [16]. Статистические модели сравнительно просты и обладают достаточной точностью. Однако их применение ограничивается пределами варьируемых в модели параметров. Кроме того, в них скрыта детерминированная зависимость между входными, управляющими и выходными параметрами.

Находят применение также смешанные детерминированно-статистические модели формы шва [22–25]. В математическом описании работы [22] преобладает эмпирический подход с использованием уравнений в виде произведения степенных функций. Однако в ней нет теоретического обоснования составленной системы уравнений.

В основе известной модели [23, 24], позволяющей рассчитать режим и размеры шва при автоматической дуговой сварке под флюсом, применяется упомянутая ранее зависимость площади проплавления от погонной энергии сварки [3]. В. И. Дятлов предложил форму проплавления представлять в виде полуэллипса, площадь которого эквивалентна теоретически определяемой площади полуокружности, а коэффициент формы проплавления выбирается по экспериментальным данным [22]. В дальнейшем по этим данным была получена формула для расчета коэффициента формы проплавления [24]. Эта детерминированно-статистическая модель позволяет рассчитать в итерационном режиме размеры шва и режим сварки.

Разработка детерминированно-статистической модели. Из приведенного анализа следует, что для решения поставленной в работе задачи целесообразно выбрать метод детерминированно-статистического моделирования и разработать модель, со-

четающую преимущества детерминированных (отражение физических процессов и универсальность) и статистических моделей (простота и высокая точность).

Очевидно, в основе любой детерминированной модели шва при сварке плавлением прежде всего следует учитывать зависимость проплавления от параметров ввода энергии, т. е. для дуговой сварки — I , U и v . В полученных ниже зависимостях глубины h и ширины e проплавления от основных параметров режима дуговой сварки I , U и v выделим в отдельные множители физические характеристики (первый множитель), КПД с коэффициентом формы проплавления (второй множитель) и параметры режима сварки (третий множитель):

$$h = \sqrt{\frac{1}{c_p \rho T_{\text{пл}}}} \sqrt{\frac{\eta_e \eta_t}{(\pi/4)\psi_{\text{п}}}} \sqrt{\frac{IU}{v}}, \quad (2)$$

$$e = \sqrt{\frac{1}{c_p \rho T_{\text{пл}}}} \sqrt{\frac{\eta_e \eta_t \psi_{\text{п}}}{\pi/4}} \sqrt{\frac{IU}{v}}, \quad (3)$$

где c_p , ρ , $T_{\text{пл}}$ — соответственно удельная теплоемкость, плотность и температура плавления свариваемого металла; η_e , η_t — соответственно эффективный и термический КПД; $\psi_{\text{п}}$ — коэффициент формы проплавления, равный e/h .

В выражениях (2) и (3) h и e не заданы в явном виде, так как входят в $\psi_{\text{п}}$. К тому же η_e и η_t существенно зависят от режима сварки. Поэтому в таком виде эти выражения непригодны для практического применения. Если удельную теплоемкость принять постоянной и равной среднему значению в диапазоне температур T_0 – $T_{\text{пл}}$, то первый множитель можно принять постоянным.

Характеристики, входящие во второй множитель, имеют различную зависимость от режима сварки. Коэффициент формы проплавления $\psi_{\text{п}}$ и эффективный КПД η_e в меньшей степени зависят от скорости сварки v . Оптимальное напряжение сварки U при дуговой сварке обычно возрастает пропорционально с увеличением сварочного тока

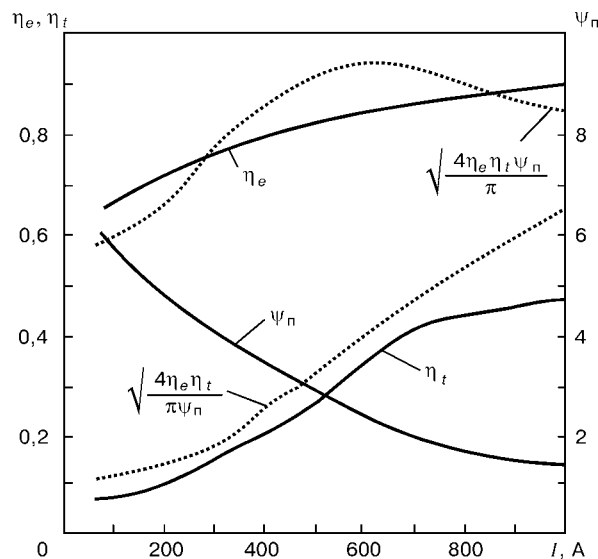


Рис. 2. Оценка влияния сварочного тока на комплексный показатель их характеристик η_e , η_t и $\psi_{\text{п}}$



I и его значение изменяется в узких пределах. Поэтому целесообразно рассмотреть второй множитель как функцию сварочного тока (рис. 2). Характер зависимости этого множителя от тока различен в (2) и (3). Так, второй множитель в выражении (2) монотонно возрастает с увеличением тока, а в выражении (3) он представляет собой кривую с максимумом. Поэтому следует ожидать различный характер зависимости (3) при изменении тока в широком диапазоне. Действительно, по экспериментальным данным, полученным при дуговой сварке в углекислом газе [25], зависимость ширины шва от тока имеет максимум.

Этот анализ дает основание представить второй множитель как функцию сварочного тока и в целом выражения для глубины и ширины проплавления в виде произведения степенных функций [26]:

$$h = K_h \frac{I^a U^b}{v^c}, \quad (4)$$

$$e = K_e \frac{I^m U^n}{v^k}. \quad (5)$$

В связи с этим в показателе степени сварочного тока выражения (4) следует ожидать его значительное увеличение по сравнению с теоретическим значением, т. е. $a \gg 0,5$. Модель можно еще упростить, если выразить напряжение через сварочный ток

$$U = K_U I^0 \quad (6)$$

и исключить его из (4) и (5). Тогда выражения для расчета размеров шва имеют вид [26]

$$h = K_h \frac{I^p}{v^q}, \quad (7)$$

$$e = K_e \frac{I^s}{v^t}. \quad (8)$$

При сварке стыковых соединений без зазора высоту выпуклости валика можно определить, используя коэффициент полноты валика μ_v [24]:

$$g = F_{II} / \mu_v e. \quad (9)$$

Из баланса расплавленного и наплавленного металлов определяем площадь наплавленного металла:

$$F_{II} = F_{II} v_{II} (1 - \psi_p) / v, \quad (10)$$

где F_{II} , F_{II} — площадь поперечного сечения соответственно наплавленного валика и проволоки; v_{II} — скорость подачи проволоки; ψ_p — коэффициент потерь на разбрызгивание.

Подставив в выражение (9) значения ширины проплавления e (3), площади наплавленного металла F_{II} (10) и скорости плавления проволоки v_{II} [27], получим зависимость g от параметров режима сварки

$$g = \frac{K_1 I^{0,5} + K_2 I^{1,5} / d}{v^{0,5} U^{0,5}}, \quad (11)$$

Таблица 1. Диапазон режимов дуговой сварки в углекислом газе

Параметр сварки	Диаметр электродной проволоки d , мм			
	1,2	1,4	1,6	2,0
Сварочный ток I , А	100...350	150...350	140...410	180...465
Напряжение сварки U , В	20...33	22...35	20...35	21...38
Скорость сварки v , мм/с	4,4...14,9	4,4...14,9	4,4...22,9	4,4...14,9

где постоянные величины объединены в коэффициенты K_1 и K_2 .

Упростив многочлен в числителе выражения (11) и представив его в виде степенной функции тока, получим выражение для определения выпуклости шва

$$g = K_g \frac{I^r}{v^w U^v} \quad (12)$$

или

$$g = K_g \frac{I^i}{v^j}. \quad (13)$$

Показатели степеней r , w , u , i , j необходимо уточнять по экспериментальным данным.

Коэффициент формы проплавления ψ_{II} можно представить как отношение выражений (4) и (5), (7) и (8) или определить непосредственно в результате статистической обработки экспериментальных данных:

$$\psi_{II} = K_{\psi} \frac{U^x}{I^y} v^z, \quad (14)$$

$$\psi_{II} = K_{\psi} \frac{v^l}{I^l}. \quad (15)$$

Проверка адекватности модели. Адекватность разработанного метода моделирования проверена при дуговой сварке плавящимся электродом в углекислом газе. Диапазон параметров режима сварки приведен в табл. 1. Сварку (наплавку) выполняли проволокой Св-08Г2С на пластинах из стали ВСтЗсп толщиной 10 мм на автомате АДГ-602 с источником питания ВДУ-601.

В табл. 2 приведены данные о режимах сварки проволокой диаметром 1,6 мм, экспериментальные, а также расчетные размеры швов, полученные на моделях М1, М2 и М3 (табл. 3) после статистической обработки экспериментальных данных методом регрессионного анализа.

Наиболее хорошее совпадение экспериментальных и расчетных размеров швов дают все модели по глубине проплавления. Среднее значение относительной погрешности не превышает 10 % (табл. 4).

Отклонения по ширине шва в различных моделях имеют большие значения, чем по глубине проплавления. Удовлетворительную точность имеет модель М2 (10,0 %), охватывающая три основных параметра сварки (I , U , v), а также модель М3 (10,4 %), учитывающая два параметра режима сварки (U , v), которые в наибольшей мере влияют на ширину шва. Если в модели не учитывается напряжение сварки, то погрешность возрастает



Таблица 2. Сравнение экспериментальных и расчетных размеров шва

№ п/п	Режим сварки			Размеры шва, мм												Коэффициент формы проплавления			
	I, А	U, В	v, мм/с	h			e			g			Ψ _п						
				экол.	расч. М1	расч. М2	расч. М3	экол.	расч. М1	расч. М2	расч. М3	экол.	расч. М1	расч. М2	расч. М3				
1	150	20.2	6.4	2.0	1.8	1.8	1.8	6.5	5.9	5.3	5.3	2.3	2.4	2.5	2.4	3.3	3.1	3.0	3.1
2	152	25.7	4.4	2.0	1.9	1.9	2.0	11.8	11.6	11.8	12.1	2.5	2.1	2.1	2.9	5.9	5.7	6.4	6.2
3	140	25.8	6.4	2.0	1.5	1.5	1.6	6.5	8.4	8.8	9.1	1.6	1.7	1.6	2.3	3.3	5.1	6.1	5.9
4	210	20.5	4.4	2.8	3.2	3.2	3.1	8.1	9.1	7.4	7.3	4.1	4.1	4.3	3.5	2.9	2.6	2.3	2.5
5	210	20.5	6.4	2.5	2.9	2.9	2.7	6.2	6.7	5.6	5.5	3.1	3.5	3.7	2.9	2.5	2.2	2.0	2.1
6	205	23.0	4.4	3.0	3.0	3.0	3.0	10.4	10.7	9.5	9.4	3.5	3.4	3.6	3.5	3.5	3.3	3.2	3.3
7	204	23.0	6.4	2.6	2.7	2.6	2.6	7.6	7.9	7.1	7.1	2.7	2.9	3.0	2.8	2.9	2.8	2.7	2.8
8	220	28.1	4.4	2.2	3.1	3.1	3.3	16.1	14.8	14.6	14.8	3.3	2.9	2.9	3.6	7.3	4.4	4.8	4.7
9	218	28.2	6.4	3.4	2.8	2.7	2.8	10.0	11.0	11.0	11.2	2.3	2.5	2.4	2.9	2.9	3.7	4.1	4.1
10	197	28.6	10.7	1.6	2.1	2.0	2.1	7.9	7.2	7.6	7.7	1.7	1.7	1.7	2.1	4.9	3.2	3.9	3.9
11	250	22.0	4.4	4.6	4.0	4.1	3.8	7.1	10.6	8.7	8.5	4.8	4.5	4.8	3.9	1.5	2.5	2.2	2.3
12	255	21.7	6.4	3.5	3.7	3.7	3.5	6.4	7.7	6.4	6.2	4.8	4.1	4.3	3.2	1.8	1.9	1.7	1.9
13	255	25.6	4.4	3.9	4.0	4.0	3.9	10.5	13.4	12.1	12.0	4.2	3.8	4.0	3.9	2.7	3.2	3.1	3.2
14	255	25.6	6.4	3.3	3.6	3.5	3.5	8.3	9.9	9.0	9.0	3.6	3.3	3.4	3.2	2.5	2.6	2.6	2.7
15	270	28.0	4.4	4.6	4.2	4.2	4.2	15.1	15.7	14.7	14.7	3.0	3.7	3.8	4.1	3.3	3.5	3.5	3.6
16	260	29.0	6.4	3.6	3.5	3.5	3.6	12.2	12.0	11.8	11.9	2.4	2.9	2.9	3.3	3.4	3.2	3.5	3.5
17	255	30.0	10.7	2.5	2.9	2.8	2.9	8.4	8.3	8.5	8.6	1.5	2.2	2.1	2.4	3.4	2.6	3.1	3.1
18	230	30.3	14.9	2.2	2.3	2.2	2.3	6.7	6.3	6.7	6.8	1.7	1.7	1.6	1.9	3.0	2.5	3.1	3.1
19	294	26.4	6.4	4.3	4.3	4.3	4.2	8.5	10.8	9.8	9.6	4.8	3.7	3.8	3.5	2.0	2.3	2.3	2.4
20	292	26.3	10.7	3.6	3.7	3.6	3.5	7.0	7.1	6.5	6.4	3.8	3.0	3.0	2.6	1.9	1.8	1.8	1.9
21	338	30.3	4.4	5.5	5.7	5.6	5.7	20.0	18.9	17.6	17.5	4.6	4.3	4.4	4.6	3.6	3.1	3.2	3.2
22	330	30.4	6.4	5.3	4.9	4.8	4.8	11.7	13.9	13.3	13.2	3.9	3.6	3.6	3.7	2.2	2.6	2.8	2.8
23	328	30.4	10.7	4.4	4.2	4.0	4.0	8.0	9.1	8.9	8.9	2.9	2.9	2.8	2.8	1.8	2.0	2.2	2.3
24	300	30.8	14.9	3.1	3.3	3.2	3.2	7.0	6.9	7.1	7.1	2.5	2.3	2.2	2.2	2.3	1.9	2.3	2.3
25	250	31.5	22.9	2.2	2.3	2.1	2.2	6.3	4.8	5.3	5.3	2.3	1.5	1.4	1.6	2.9	2.0	2.5	2.5
26	355	28.9	14.9	4.4	4.3	4.1	4.0	7.7	6.6	6.3	6.1	2.4	3.0	2.9	2.5	1.8	1.4	1.5	1.6
27	302	29.1	22.9	2.6	3.0	2.8	2.8	6.2	4.5	4.5	4.5	1.8	2.1	2.0	1.8	2.4	1.4	1.6	1.7
28	390	33.8	4.4	6.5	6.7	6.7	6.8	23.4	23.2	22.4	22.4	5.0	4.4	4.5	5.0	3.6	3.2	3.4	3.4
29	410	33.6	6.4	6.2	6.5	6.4	6.4	14.0	17.2	16.7	16.5	3.2	4.0	4.1	4.2	2.3	2.5	2.6	2.7
30	390	33.8	10.7	5.4	5.2	5.0	5.0	11.4	11.3	11.3	11.3	2.6	3.1	3.0	3.1	2.1	2.0	2.3	2.3
31	380	33.9	14.9	4.1	4.6	4.3	4.3	9.0	8.6	8.8	8.8	2.1	2.6	2.5	2.6	2.2	1.8	2.1	2.1
32	325	34.7	22.9	2.7	3.2	3.0	3.1	7.2	6.0	6.6	6.6	2.0	1.8	1.7	1.9	2.7	1.7	2.2	2.3

Таблица 3. Модели формы шва

Модель	Диаметр электродной проволоки d , мм			
	1,2	1,4	1,6	2,0
M1	$h = 0,007 \frac{I^{1,415}}{d^{0,337} U^{0,262} v^{0,289}}$	$e = 0,063 \frac{d^{0,020} I^{0,297} U^{1,513}}{v^{0,812}}$	$g = 0,954 \frac{I^{1,141}}{d^{0,593} U^{1,251} v^{0,399}}$	$\Psi_{II} = 9,0 \frac{d^{0,357} U^{1,775}}{I^{1,118} v^{0,523}}$
M2	$h = 0,002 \frac{I^{1,389} U^{0,172}}{v^{0,340}}$	$h = 0,010 \frac{I^{1,539}}{U^{0,684} v^{0,219}}$	$h = 0,006 \frac{I^{1,455}}{U^{0,340} v^{0,325}}$	$h = 0,007 \frac{I^{1,444}}{U^{0,339} v^{0,342}}$
	$e = 0,054 \frac{I^{0,460} U^{1,254}}{v^{0,741}}$	$e = 0,055 \frac{I^{0,408} U^{1,406}}{v^{0,858}}$	$e = 0,026 \frac{I^{0,066} U^{2,131}}{v^{0,768}}$	$e = 0,313 \frac{I^{0,082} U^{1,453}}{v^{0,886}}$
	$g = 0,290 \frac{I^{1,254}}{U^{1,109} v^{0,392}}$	$g = 1,253 \frac{I^{1,098}}{U^{1,323} v^{0,410}}$	$g = 1,024 \frac{I^{1,193}}{U^{1,415} v^{0,441}}$	$g = 0,609 \frac{I^{0,792}}{U^{0,649} v^{0,401}}$
M3	$h = 0,201 \frac{I^{0,556}}{v^{0,198}}$	$h = 0,006 \frac{I^{1,249}}{v^{0,258}}$	$h = 0,005 \frac{I^{1,288}}{v^{0,342}}$	$h = 0,005 \frac{I^{1,308}}{v^{0,398}}$
	$e = 0,058 \frac{U^{1,938}}{v^{0,655}}$	$e = 0,146 \frac{U^{1,804}}{v^{0,877}}$	$e = 0,026 \frac{U^{2,245}}{v^{0,772}}$	$e = 0,354 \frac{U^{1,554}}{v^{0,889}}$
	$g = 0,089 \frac{I^{0,817}}{v^{0,431}}$	$g = 0,341 \frac{I^{0,573}}{v^{0,492}}$	$g = 0,391 \frac{I^{0,559}}{v^{0,535}}$	$g = 0,410 \frac{I^{0,499}}{v^{0,469}}$



до 20,5 %. В отдельных опытах погрешность по ширине шва существенно превышает средние значения, что связано с образованием наплывов или подрезов при сварке на больших токах с малыми или большими скоростями сварки. В таких случаях возникали трудности при определении границы проплавления в верхней части шва и измерении ширины шва. Кроме того, как отмечалось ранее, зависимость ширины шва от тока имеет максимум, что снижает точность модели, представляющей собой монотонную функцию. Модель М3 с выборочной комбинацией из двух значимых параметров I , U , v также имеет удовлетворительную точность.

Анализ полученных моделей в виде степенных выражений (табл. 3) показывает, что они качественно и количественно отражают детерминированные зависимости размеров шва от основных параметров дуговой сварки. Обращает внимание неоднозначное влияние напряжения сварки на глубину проплавления (см. табл. 3, модель М2). Очевидно, в случае дуговой сварки в углекислом газе тонкой ($d \leq 1,2$ мм) проволокой перенос электродного металла происходит с короткими замыканиями при короткой дуге и влияние напряжения на глубину проплавления определяется его энергетическим вкладом (напряжение находится в числителе дроби), что соответствует исходной теоретической предпосылке (2). При сварке проволоками больших ($d \geq 1,4$ мм) диаметров на повышенных токе и напряжении перенос электродного металла, как правило, без коротких замыканий при длинной дуге, что увеличивает амплитуду блуждающих колебаний дуги, снижает плотность вводимой энергии и соответственно глубину проплавления (напряжение находится в знаменателе дроби).

Сравнение показателей степеней у параметров сварки (I , U , v) в теоретически полученных выражениях (2) и (3) с показателями (см. табл. 3, модель М2) после статистической обработки экспериментальных данных показывает существенное различие, что связано с принятой идеализацией проплавления [3]. Наиболее близкими к теоретическому значению (0,5) являются показатели степени у скорости сварки в формулах для h (0,22... 0,34) и e (0,74... 0,88), что можно объяснить влиянием скорости сварки на размеры шва как механического параметра. Иная картина наблюдается в отношении сварочного тока и напряжения. В формуле для расчета h показатель степени значительно выше теоретического (0,5) и составляет 1,4... 1,5, что свидетельствует о высокой значимости этого параметра. Из формулы для расчета e видно, что для ширины шва более значимым параметром сварки является напряжение с показателем степени 1,3... 2,0.

Анализ моделей показывает, что они не противоречат существующим представлениям. Комбинируя параметры сварки в моделях и изменяя коэффициенты, можно получить зависимости, максимально отражающие сущность физических процессов при удовлетворительной точности.

Метод моделирования может найти применение при исследовании влияния технологических факторов (состава материала, типа соединения и шва,

Таблица 4. Относительная погрешность моделей формы шва при дуговой сварке в углекислом газе проволокой $d = 1,6$ мм, %

Модель	Размеры шва, мм			Ψ_n
	h	e	g	
М1	9,9	12,6	13,5	18,7
М2	8,7	10,0	13,2	16,8
М3	8,8	10,4	17,4	16,2

положения сварки, точности сборки и др.) на форму шва при дуговой сварке.

Такие модели можно использовать при разработке систем автоматизированного управления процессом дуговой сварки, методик расчета и оптимизации параметров режима сварки, систем автоматизированного обучения, модулей САПР ТП, АРМ технолога и экспертных систем.

Выводы

1. На основе известной теории тепловых процессов при сварке показана целесообразность представления математической модели формы шва при дуговой сварке в виде произведения степенных функций.

2. Метод моделирования отражает детерминированные зависимости между формой и размерами шва и основными параметрами режима дуговой сварки.

3. Сравнение экспериментальных и расчетных размеров шва на примере дуговой сварки (наплавки) в углекислом газе плавящимся электродом показало удовлетворительный уровень адекватности разработанных моделей. Относительная погрешность по основным параметрам шва не превышает 10... 15%.

4. Модели можно использовать для дальнейших исследований процесса проплавления и формирования шва при дуговой сварке. Простота моделей (два управляющих параметра) и удовлетворительная точность позволяют их использовать в системах автоматизированного управления с технологической адаптацией.

1. *Махненко В. И.* Математические методы и научно-технический прогресс в сварочном производстве // Математические методы в сварке. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1986. — С. 3–8.
2. *Скрябин В. И., Шафран В. Б., Дубровский В. В.* Математическое моделирование. — Киев: Техніка, 1983. — 270 с.
3. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. — М.: Машгиз, 1951. — 296 с.
4. *Ерохин А. А.* Основы сварки плавлением. Физико-химические закономерности. — М.: Машиностроение, 1973. — 448 с.
5. *Судник В. А.* Математические методы детерминированной оценки формирования сварных соединений // Математические методы в сварке. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1986. — С. 64–74.
6. *Математическое моделирование формирования шва при аргодуговой сварке стыковых соединений тонколистового волокнистого композиционного материала системы алюминий–бор* / В. М. Денисов, А. Ф. Нестеров, В. А. Судник и др. // Свароч. пр-во. — 1994. — № 11. — С. 14–17.
7. *Березовский В. М.* Математическое моделирование формирования швов при дуговой сварке в различных пространственных положениях // Математические методы в сварке. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1986. — С. 111–116.



8. Попков А. М. Расчет параметров шва при сварке в углекислом газе стыковых бескосых соединений // Свароч. пр-во. — 1986. — № 9. — С. 21–22.
9. Попков А. М., Худяков В. И. Расчет параметров угловых швов при сварке в углекислом газе // Там же. — 1988. — № 10. — С. 21–22.
10. Лебедев Б. Д., Перемитыко В. В. Расчетные методы в сварке плавлением. — Днепропетровск: Изд-во ДГТУ, 1998. — 283 с.
11. Влияние параметров режима ручной дуговой сварки модулированным током на форму шва / Д. А. Дудко, С. А. Зацерковный, В. С. Сидорук и др. // Автомат. сварка. — 1987. — № 6. — С. 19–22.
12. Турых Э., Лясовски Э. Разработка математической модели для определения геометрии слоя, наплавленного под флюсом // Математические методы в сварке. — Киев: Наук. думка, 1981. — С. 185–193.
13. Коренюк Ю. М., Мишина Л. Н. Оптимизация режима сварки по флюсу алюминия толщиной 70 мм // Свароч. пр-во. — 1989. — № 7. — С. 16–17.
14. Влияние параметров дуговой потолочной сварки под флюсом на размеры и форму швов / П. А. Варенчук, Н. Т. Привалов, В. И. Галинич и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 3. — С. 38–41.
15. Рыжов Ф. Н., Ву Гуй Лан. Оптимизация технологии восстановления коленчатых валов, изготовленных из закаливающих сталей // Свароч. пр-во. — 1994. — № 1. — С. 4–6.
16. Васильев Н. Г. Оптимизация технологии наплавки изношенных деталей // Там же. — 1994. — № 7. — С. 4–7.
17. Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г. Оптимизация режима сварки в CO_2 // Автомат. сварка. — 1980. — № 12. — С. 30–34.
18. Дубовецкий С. В., Сергацкий Г. И., Касаткин О. Г. Оптимизация режима сварки угловых швов в CO_2 в различных пространственных положениях // Там же. — 1982. — № 5. — С. 34–38.
19. Дубовецкий С. В., Касаткин О. Г. Оптимизация режимов сварки с использованием регрессионных моделей формирования шва // Математические методы в сварке. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1986. — С. 102–111.
20. Нероденко М. М., Коваленко Р. И., Василенко Т. Н. Расчет параметров ванны при автоматической дуговой сварке в гелии тонколистовых ниобиевых и молибденовых сплавов // Автомат. сварка. — 1979. — № 12. — С. 13–15.
21. Нероденко М. М., Демченко А. Д., Кундик В. В. Расчет геометрических параметров ванны при механизированной дуговой сварке тонких пластин ванадиевых и вольфрамовых сплавов // Там же. — 1982. — № 6. — С. 17–20.
22. Бабкин А. С., Кривошея В. Е. Разработка алгоритма расчета параметров режима сварки в углекислом газе на микро-ЭВМ // Свароч. пр-во. — 1985. — № 4. — С. 3–5.
23. Дятлов В. И. Расчет режимов автоматической сварки. — Киев: КПИ, 1959. — 16 с.
24. Акулов А. И., Бельчук Г. А., Демянецвич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением: Учебник. — М.: Машиностроение, 1977. — 432 с.
25. Потатьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. — М.: Машиностроение, 1974. — 240 с.
26. Коринец И. Ф. Разработка инженерных методов расчета режимов дуговой сварки // Применение математических методов в сварке. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1988. — С. 80–86.
27. Коринец И. Ф. Математическая модель плавления электродной проволоки при дуговой сварке // Автомат. сварка. — 1995. — № 10. — С. 39–43.

Theoretical grounds of efficiency of construction of deterministic-statistical models in the form of product of power functions are presented. The adequacy of the constructed mathematical models combining the advantages of deterministic (reflection of physical processes and versatility) and statistic (simplicity and high accuracy) models was checked on the example of the CO_2 welding. The fields of application of models are shown.

Поступила в редакцию 19.12.2000