



УДК 621.791.754

## СВЯЗЬ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИМПУЛЬСНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ С ГЕОМЕТРИЕЙ НАПЛАВЛЕННОГО ВАЛИКА НА СТАЛЬ AISI 304L

**П. К. ГИРИДХАРАН**, доц. (Технологический ин-т Амрита, Индия)  
**Н. МУРУГАН**, проф. (Технологический ин-т Куамбатор, Индия)

Разработаны и описаны математические модели, устанавливающие связь между контролируемыми параметрами процесса импульсной сварки (ток и длительность импульса, скорость сварки) и параметрами валика шва (проплавление, ширина валика, коэффициент формы шва и площадь валика шва). Подтверждена адекватность моделей, основанных на регрессионном и дисперсионном анализе.

*Ключевые слова:* импульсная дуговая сварка, вольфрамовый электрод, нержавеющая тонколистовая сталь, параметры процесса, наплавленный валик, математические модели, планирование экспериментов, дисперсионный анализ, оптимизация

Импульсной дуговой сваркой можно соединять тонкие материалы, материалы средней толщины (например, листы нержавеющей стали), а также применять в тех случаях, когда управление металлургическими процессами в металле шва играет решающую роль. С целью обеспечения хорошего формирования металла шва выбор параметров процесса и технологии сварки должен быть конкретизирован.

При импульсной дуговой сварке благодаря пульсации сварочного тока от высокого до низкого уровня в течение коротких или длительных периодов времени обеспечивается в период импульса нагрев зоны шва до точки плавления, а в период протекания фонового тока расплавленная сварочная ванна охлаждается и затвердевает. Форма валика шва представляет собой серию накладывающихся друг на друга сварных точек, а степень их перекрытия зависит от частоты импульсов и скорости сварки [1]. Параметры процесса импульсной дуговой сварки приведены на рис. 1. Металл шва при сварке нержавеющей стали, полученный импульсным дуговым процессом, наряду с соответствующей геометрией, должен иметь высокие механические свойства и коррозионную стойкость [2]. Одной из основных проблем при сварке тонких листов аустенитной нержавеющей стали различных плавок являются колебания глубины их проплавления. В настоящее время для устранения колебаний глубины проплавления применяют дополнительную подачу присадочного материала, а также рекомендуется использование для автоматической сварки нержавеющей стали с содержанием серы не менее 0,008 % [1].

В работах [3–7] рассматривается выбор оптимального сочетания параметров процесса импульсной дуговой сварки для обеспечения удовлетворительного формирования валика при сварке тонколистовой нержавеющей стали. В работах содержатся сведения о планировании экспериментов с использованием трехуровневого полнофакторного плана для выполнения наплавки валика на лист (нержавеющая сталь 304L). Однако данных о корреляции параметров сварочного процесса и параметрами валика с использованием математических моделей для сварки тонколистовой нержавеющей стали нет [5]. Поэтому была предпринята попытка прогнозирования и оптимизации параметров валика шва с использованием математических моделей. Для разработки последних использовали статистически спланированный эксперимент, основанный на центральном композитном ротатабельном плане, с применением полнофакторного метода [8–10]. Для изучения основного и совместного воздействия параметров сварочного процесса на параметры валика шва использовали морфологию поверхности отклика. С целью уточнения параметров валика шва провели оптимизацию процесса сварки. Площадь валика шва рассматривали как объективную функцию (для минимального тепловложения), другие параметры

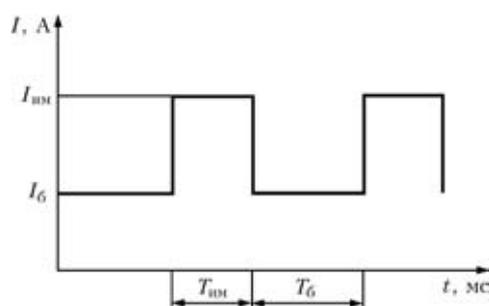


Рис. 1. Параметры процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах:  $I_б$  — базовый ток, А;  $I_{имп}$  — ток импульса, А;  $T_б$  — длительность базового тока, мс;  $T_{имп}$  — длительность тока импульса, мс

© П. К. Гиридхаран, Н. Муруган, 2007



(ширину, проплавление и коэффициент формы шва и его пределы) — как ограничения.

**Методика проведения эксперимента.** Листы аустенитной нержавеющей стали типа AISI 304L размером 100×50×3 мм сваривали встык способом ТИГ без разделки кромок. Химический состав листовой нержавеющей стали AISI 304L следующий, мас. %: 0,017 С; 10,1 Ni; 18,71 Cr; 0,22 Si; 1,64 Mn; 0,027 P; 0,047 S; 0,015 N; 69,224 Fe. Эксперименты проводили на итальянской установке для импульсной сварки ТИГ/МИГ Эссетти-Унимакро 501С. Для защиты и обратной продувки использовали аргон промышленной чистоты. Фиксированные параметры процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах следующие: частота импульсов 1 Гц; длина дуги 2 мм; среднее напряжение дуги 14 В; диаметр вольфрамового электрода 2,4 мм; угол заточки электрода 60°; расход газа (аргон): защитный 10 и продувка 5 л/мин. Использовали функцию автоматического управления напряжением, имеющуюся в оборудовании. Тепловложение рассчитывали по показаниям напряжения и тока на оборудовании.

Для проведения экспериментов и построения математических моделей независимо определяли регулируемые переменные: ток импульса  $I_{им}$ , длительность импульса тока  $T_{им}$ , скорость сварки  $S$ . В течение всего эксперимента соотношение базового и тока импульса поддерживалось равным 0,2.

С целью определения пределов каждой контролируемой переменной процесса была смоделирована опытная сварка для получения шва с полным проплавлением без каких-либо видимых дефектов. Учитывая несложность вычислений и более высокую интерпретируемость моделей, параметры преобразовали в закодированную форму для построения математических моделей и гра-

фиков, а также дальнейшего анализа результатов. Верхний предел множителя кодировался как +1,682, нижний как -1,682. Закодированное значение для промежуточных величин вычисляли с помощью следующей зависимости [10]:

$$X_i = (3,364 \cdot (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})) - 1,682, \quad (1)$$

где  $X$  — любое значение переменной от  $X_{\min}$  до  $X_{\max}$ ;  $X_i$  — требуемое закодированное значение  $X$ .

Выбранные переменные значения процесса импульсной дуговой сварки приведены в табл. 1. При этом использован центральный композитный ротатабельный пятиуровневый полнофакторный план экспериментов, состоящий из 20 серий [9, 10]. Эксперименты проводили произвольно во избежание появления систематической погрешности в методике.

Во время опытного прогона было обнаружено, что проплавление свариваемых пластин минимально между двумя импульсами, т. е. в месте максимального перекрытия валиков. Следовательно, при условии обеспечения проплавления в этом участке можно обеспечить полное проплавление по всей длине шва. Для измерения параметров валика шва на стыковом соединении нержавеющей стали выделен участок А-А с максимальным перекрытием (рис. 2).

Для определения макроструктуры сварные образцы шириной 10 мм вырезали и устанавливали на бейкелите, затем подвергали полировке и электролитическому травлению в 10%-м растворе щавелевой кислоты (рис. 3). Профиль валика шва, ширину валика  $W$ , глубину проплавления  $P$  и площадь валика шва  $BA$  определяли с помощью оптического профильного проектора и цифрового планиметра. Коэффициент формы шва вычисляли по измеренной ширине валика шва и глубине проплавления ( $AR$  — ширина валика/глубина проплавления).

Важным фактором, влияющим на геометрию валика, механические, металлургические и коррозионные свойства шва, является тепловложение, которое пропорционально напряжению и току и обратно пропорционально скорости сварки. В от-

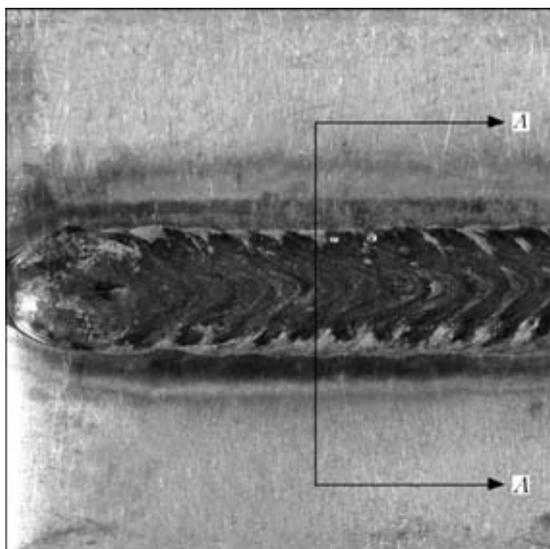


Рис. 2. Металл шва на пластине, выполненный импульсным дуговым процессом в защитных газах

Таблица 1. Переменные значения процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах

Значения переменных процесса	$I_{им}, А$	$T_{им}, мс$	$S, см/мин$
-1,628	180	450	11
-1	188	490	12,6
0	200	550	15
1	212	610	17,4
1,628	220	650	19

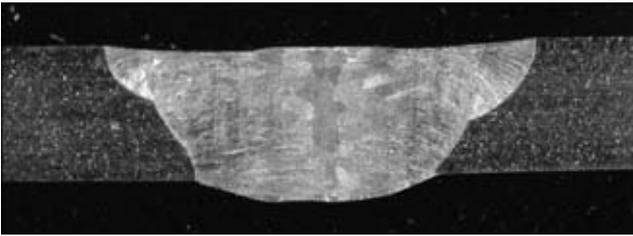


Рис. 3. Макрошлиф сварного соединения с разрезом по А-А, показывающим профиль металла шва (X6)

личие от процесса дуговой сварки неплавящимся электродом в защитных газах на непрерывном токе, когда тепловложение вычисляется по непрерывному току, при импульсном процессе тепловложение вычисляется по среднему току  $I_{cp}$  по уравнению

$$I_{cp} = \frac{I_{им} T_{им} I_6 T_6}{T_{им} + T_6} \quad (2)$$

Тепловложение при импульсной дуговой сварке плавящимся электродом в защитных газах  $HI$  вычисляется по уравнению

$$HI = (I_{cp} U/S)\eta \quad (3)$$

где  $U$  — среднее напряжение, В;  $\eta$  — производительность процесса сварки.

Для импульсной дуговой сварки принимали  $\eta = 60\%$ . В ходе эксперимента установлено, что напряжение изменяется в пределах 13,4...14,6 В. Поэтому для расчетов тепловложения использовали среднее напряжение, равное 14 В. Значения ширины валика шва, глубины проплавления, площади валика шва и коэффициента формы шва и тепловложения для образцов, полученных импульсной дуговой сваркой, приведены в табл. 2.

**Разработка математической модели.** Для разработки математической модели и прогнозирования геометрии валика шва использовали регрессионный метод [11]. Функция поверхности отклика, отражающая любую геометрию валика, может быть выражена как  $Y = f(I_{им}, T_{им}, S)$ , а выбранная зависимость, являющаяся поверхностью отклика второго порядка, следующим образом [10]:

$$Y = b_0 + b_1 I_{им} + b_2 T_{им} + b_3 S + b_{11} I_{им}^2 + b_{22} T_{им}^2 + b_{33} S^2 + b_{12} I_{им} T_{им} + b_{13} I_{им} S + b_{23} T_{им} S, \quad (4)$$

где  $b_0, b_3$  — соответственно постоянный член и коэффициенты линейных членов;  $b_{11}, b_{22}, b_{33}$  — коэффициенты квадратных членов второго порядка;  $b_{12}, b_{13}, b_{23}$  — коэффициенты взаимодействующих членов второго порядка.

Т а б л и ц а 2. Матрица плана и полученные значения параметров валика и тепловложения

Код образца	Параметры импульсного процесса			Глубина проплавления $P$ , мм	Ширина валика $W$ , мм	Площадь валика $VA$ , мм <sup>2</sup>	Коэффициент формы шва $AR$	Тепловложение $HI$ , кДж/мм
	$I_{им}$ , А	$T_{им}$ , мс	$S$ , см/мин					
S1	-1	-1	-1	2,36	8,79	12,04	3,725	0,75
S2	1	-1	-1	3,54	9,77	20,93	2,76	0,83
S3	-1	1	-1	3,4	9,24	18,88	2,718	0,87
S4	1	1	-1	3,85	9,8	23,29	2,545	0,97
S5	-1	-1	1	1,66	7,75	7,85	4,668	0,54
S6	1	-1	1	2,98	8,54	13,5	2,866	0,6
S7	-1	1	1	2,37	8,18	10,94	3,451	0,63
S8	1	1	1	3,43	9,33	18,15	2,72	0,70
S9	-1,682	0	0	1,90	7,89	8,62	4,153	0,66
S10	1,682	0	0	3,59	9,52	19,4	2,652	0,78
S11	0	-1,682	0	1,85	7,58	8,68	4,097	0,63
S12	0	1,682	0	3,73	8,79	22,5	2,357	0,81
S13	0	0	-1,682	3,84	10,26	24,66	2,672	0,98
S14	0	0	1,682	1,95	8,385	8,95	4,30	0,57
S15	0	0	0	3,45	9,1	18,44	2,638	0,72
S16	0	0	0	3,78	8,62	20,01	2,28	0,72
S17	0	0	0	3,48	9,14	20,63	2,626	0,72
S18	0	0	0	3,48	9,08	20,91	2,609	0,72
S19	0	0	0	3,84	8,73	21,58	2,273	0,72
S20	0	0	0	3,83	8,75	19,76	2,285	0,72



Коэффициенты приведенного выше полиномиального уравнения вычисляли по следующим уравнениям регрессии [10]:

$$b_0 = 0,166338((\sum X_0 Y) - 0,05679(\sum \sum X_{ii} Y)), \quad (5)$$

$$b_i = 0,073224(\sum X_i Y), \quad (6)$$

$$b_{ii} = 0,0625((\sum X_{ii} Y) + 0,006889(\sum \sum X_{ii} Y) - 0,056791(\sum X_0 Y)), \quad (7)$$

$$b_{ij} = 0,125000(\sum X_{ij} Y), \quad (8)$$

где  $X_i, X_{ii}, X_{ij}$  — значения членов первого порядка, квадратов второго порядка и взаимодействующих членов параметров процесса;  $Y$  — наблюдаемый отклик.

Первоначально математические модели разрабатывали с помощью коэффициентов, полученных из приведенных выше уравнений:

$$P = 3,637 + 0,502I_{им} + 0,415T_{им} - 0,431S - 0,278I_{им}^2 - 0,262T_{им}^2 - 0,225S^2 - 0,124I_{им}T_{им} + 0,094I_{им}S - 0,024T_{им}S, \quad (9)$$

$$W = 8,897 + 0,456I_{им} + 0,273T_{им} - 0,509S - 0,028I_{им}^2 - 0,212T_{им}^2 + 0,19S^2 - 0,007I_{им}T_{им} + 0,05I_{им}S + 0,092T_{им}S, \quad (10)$$

$$AR = 2,46 - 0,454I_{им} - 0,404T_{им} + 0,344S - 0,284I_{им}^2 + 0,222T_{им}^2 + 0,314S^2 + 0,233I_{им}T_{им} - 0,174I_{им}S - 0,183T_{им}S, \quad (11)$$

$$BA = 20,205 + 3,243I_{им} + 2,942T_{им} - 3,743S - 2,087I_{им}^2 - 1,528T_{им}^2 - 1,099S^2 - 0,365I_{им}T_{им} - 0,055I_{им}S - 0,183T_{им}S, \quad (12)$$

$$HI = 0,72 + 0,037I_{им} + 0,055T_{им} - 0,12S - 0,001I_{им}^2 - 0,001T_{им}^2 - 0,019S^2 + 0,004I_{им}T_{им} - 0,006I_{им}S - 0,009T_{им}S. \quad (13)$$

Значимость коэффициентов проверяли с помощью  $t$ -теста [12], а также метода обратного исключения, имеющегося в пакете математического обеспечения SYSTAT [13]. Окончательные модели разрабатывали с использованием значимых коэффициентов только после исключения незначимого коэффициента с соответствующим откликом.

Разработанные модели проверяли на адекватность с помощью регрессионного анализа. Значения скорректированного квадратичного кратного  $R$  и стандартной погрешности оценки как для полной, так и для сокращенной модели приведены в табл. 3. Установлено, что сокращенные модели лучше полных, поскольку имеют более высокие значения от-

Таблица 3. Сравнение квадратичных кратных величин  $R$  и стандартной погрешности оценки для полной и сокращенной модели

Параметр модели валика	Откорректированное квадратичное кратное $R$		Стандартная погрешность оценки	
	Полная модель	Сокращенная модель	Полная модель	Сокращенная модель
$P$	0,887	0,888	0,262	0,261
$W$	0,886	0,904	0,237	0,218
$BA$	0,899	0,919	1,766	1,583
$AR$	0,877	0,888	0,264	0,252

корректированного квадратичного кратного  $R$  и меньшие значения стандартной погрешности, чем в соответствующих полных моделях. Адекватность разработанных моделей также проверяли с помощью дисперсионного анализа (ANOVA) [14].

Окончательные математические модели с параметрами процесса в закодированной форме, определенные с помощью регрессионного анализа, следующие:

$$P = 3,637 + 0,502I_{им} + 0,419T_{им} - 0,433S - 0,276I_{им}^2 - 0,265T_{им}^2 - 0,226S^2, \quad (14)$$

$$W = 8,874 + 0,456I_{им} + 0,273T_{им} - 0,509S - 0,209T_{им}^2 + 0,193S^2, \quad (15)$$

$$AR = 2,46 - 0,454I_{им} - 0,404T_{им} + 0,344S - 0,284I_{им}^2 + 0,314S^2 + 0,233I_{им}T_{им} - 0,174I_{им}S, \quad (16)$$

$$BA = 20,205 + 3,243I_{им} + 2,942T_{им} - 3,743S - 2,087I_{им}^2 - 1,528T_{им}^2 - 1,099S^2, \quad (17)$$

$$HI = 0,72 + 0,037I_{им} + 0,055T_{им} - 0,12S - 0,001I_{им}^2 - 0,001T_{им}^2 - 0,019S^2 + 0,004I_{им}T_{им} - 0,006I_{им}S - 0,009T_{им}S. \quad (18)$$

**Проверка модели.** Точность моделей оценивали на том же экспериментальном оборудовании. Установлено, что разработанные модели позволяют прогнозировать параметры валика с достаточной степенью точности (табл. 4). Достоверность модели была также проверена путем составления диаграмм разброса, которые показывают степень совпадения экспериментальных и прогнозируемых значений размеров валика шва. Характерная диаграмма разброса площади валика показана на рис. 4.

**Оптимизация площади валика.** Поскольку процесс сварки должен обеспечить выполнение ряда требований (полное проплавление, минимальная площадь валика шва, ширину шва для обеспечения хорошего качества шва и максималь-



ную скорость сварки для повышения производительности и т. д.), оптимизация по одному из них является компромиссом [15, 16]. Разработанные модели использовали при уточнении параметров процесса импульсной дуговой сварки для обеспечения оптимальной геометрии валика шва. Площадь шва является важным параметром валика шва, который в свою очередь зависит от других параметров таких, как проплавление, ширина валика и коэффициент формы шва. Контроль площади валика шва обеспечивает минимальное тепловложение, лучший контроль других геометрических параметров валика, а также оптимальное использование сварочного источника питания.

На основании опытных испытаний выбраны оптимальные значения параметров. Результаты показали, что для получения хорошей геометрии валика шва с полным проплавлением необходимо обеспечить ширину валика шва менее 9 мм, глубину проплавления более 3,4 мм, коэффициент формы шва 2,5...3 и площадь валика 15...20 мм<sup>2</sup>.

При оптимизации площадь валика принимали как объективную функцию, а проплавление, ширину валика, коэффициент формы шва и площадь валика — как уравнение связи. Путем сведения площади валика до минимума можно обеспечить минимальное тепловложение, что приведет к оптимальному использованию параметров процесса и мощности. Оптимизация процесса предусматривала решение нелинейной задачи ограниченной минимизации с использованием квазиютоновского метода численной оптимизации [16], который хорошо подходит для уравнения второго порядка, а также является простым, эффективным и быстрым [17, 18].

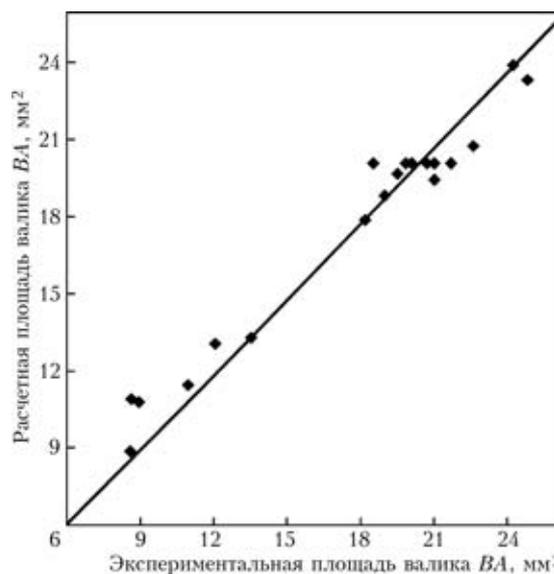


Рис. 4. Сопоставление разброса значений площади валика

Для оптимизации использовали программу из программного пакета MATLAB, вариант 7 (выпуск-14, 2004), а также «Solver», имеющийся в «Microsoft Excel» 2000.

Оптимизированные параметры импульсного процесса дуговой сварки:  $I_{им} = 211,4$  А;  $T_{им} = 537,65$  мс;  $S = 16,51$  см/мин. Оптимизированные параметры валика:  $P = 3,4$  мм;  $W = 9$  мм;  $AR = 2,572$ ;  $BA = 17,89$  мм<sup>2</sup>.

Были заданы параметры импульсной дуговой сварки, близкие к прогнозируемым оптимальным параметрам процесса, а также проведены лабораторные испытания на соответствие. Установлено, что полученные результаты с высокой точностью подтверждают прогнозируемые и экспе-

Таблица 4. Результаты соответствия экспериментальных и прогнозируемых значений

Номер теста	Параметры процесса			Проплавление P, мм			Ширина валика W, мм		
	$I_{им}$ , А	$T_{им}$ , мс	S, см/мин	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %
1	200	550	17	3,11	2,98	-4,27	8,58	8,77	2,19
2	212	603	17,14	3,45	3,31	-4,15	9,11	9,23	1,37
3	211,4	537,65	16,51	3,40	3,28	-3,53	9,00	9,17	1,91
Средняя ошибка						-3,98	Средняя ошибка		1,82

Окончание табл. 4

Номер теста	Параметры процесса			Коэффициент формы шва AR			Площадь валика BA, мм <sup>2</sup>		
	$I_{им}$ , А	$T_{им}$ , мс	S, см/мин	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %	Прогнозируемые значения	Полученные значения	Погрешность, %
1	200	550	17	2,971	2,943	-0,96	16,28	17,051	4,73
2	212	603	17,14	2,721	2,788	2,45	18,51	19,017	2,74
3	211,4	537,65	16,51	2,572	2,795	-2,03	16,63	16,014	-3,70
Средняя ошибка						-0,18	Средняя ошибка		1,25

Примечание. Погрешность, % = (полученные значения - прогнозируемые) / прогнозируемые значения.



риментально полученные оптимальные параметры валика.

**Результаты и их обсуждение.** Разработаны математические модели, коррелирующие параметры импульсной дуговой сварки с геометрией валика шва, для сварки тонких листов аустенитной нержавеющей стали 304L.

Проанализированы возможные причины основного и совместного влияния параметров процесса импульсной сварки на параметры валика шва, представленные на рис. 5–9. Графики контурной поверхности и поверхности отклика были построены с использованием пакета «SYSTAT» [13].

Влияние тепловложения на параметры валика рассмотрено с использованием модели тепловложения (18). Из уравнений (14), (15) и (17) видно, что параметры процесса не оказывают влияния на  $P$ ,  $W$  и  $BA$ , в то время, как из уравнения (16), очевидно, что коэффициент формы шва оказывает совместное влияние с другими параметрами (рис. 6–9).

**Прямое влияние тока импульса  $I_{им}$  на параметры валика шва и тепловложение.** Как видно из рис. 5, а,  $I_{им}$  повышается от 180 до 220 А,  $HI$  и  $W$  соответственно стабильно увеличиваются от 0,65 до 0,78 кДж/мм и от 8,107 до 9,641 мм. Параметры  $P$  и  $BA$  существенно повышаются от 2,01 до 3,86 мм и от 8,84 до 21,36 мм<sup>2</sup> соответственно при возрастании  $I_{им}$  от 180 до 212 А и выше. Значения параметров  $P$  и  $BA$  снижаются не так существенно — соответственно до 3,7 м и 19,75 мм<sup>2</sup>, в то время как  $AR$  вначале значительно снижается от 4,02 до 2,29 при повышении  $I_{им}$  до 212 А, а затем увеличивается до 2,5 при повышении  $I_{им}$  до 220 А. Параметр  $AR$  снижается вследствие значительного повышения  $W$  по сравнению с  $P$  при дальнейшем росте  $I_{им}$ . Скорость повышения  $BA$  высокая при росте  $I_{им}$  от 180 до 212 А, что может быть следствием значительного повышения как  $P$ , так и  $W$ . Таким образом, повышение тока импульса  $I_{им}$  положительно влияет на  $W$  и  $HI$  и неоднозначно на  $AR$ ,  $BA$  и  $P$ .

**Прямое воздействие длительности тока импульса  $T_{им}$  на параметры валика шва и тепловложение.** Как видно из рис. 5, б,  $T_{им}$  повышается от 450 до 650 мс,  $HI$  стабильно увеличивается от 0,59 до 0,78 кДж/мм. Параметры  $W$ ,  $P$  и  $BA$  существенно возрастают от 7,82 до 8,938 мм, от 2,18 до 3,79 мм и от 10,93 до 21,62 мм<sup>2</sup> соответственно при росте  $T_{им}$  от 450 до 610 мс, а затем все параметры валика снижаются менее значительно при повышении  $T_{им}$  свыше 610 мс. Ширина валика первоначально значительно возрастает при повышении  $T_{им}$  до 550 мс, а при  $T_{им} > 550$  мс благодаря постоянной ширине зоны дуги существенного изменения  $W$  не наблюдается. Значение  $AR$  вначале снижается от 3,76 до 2,27 при

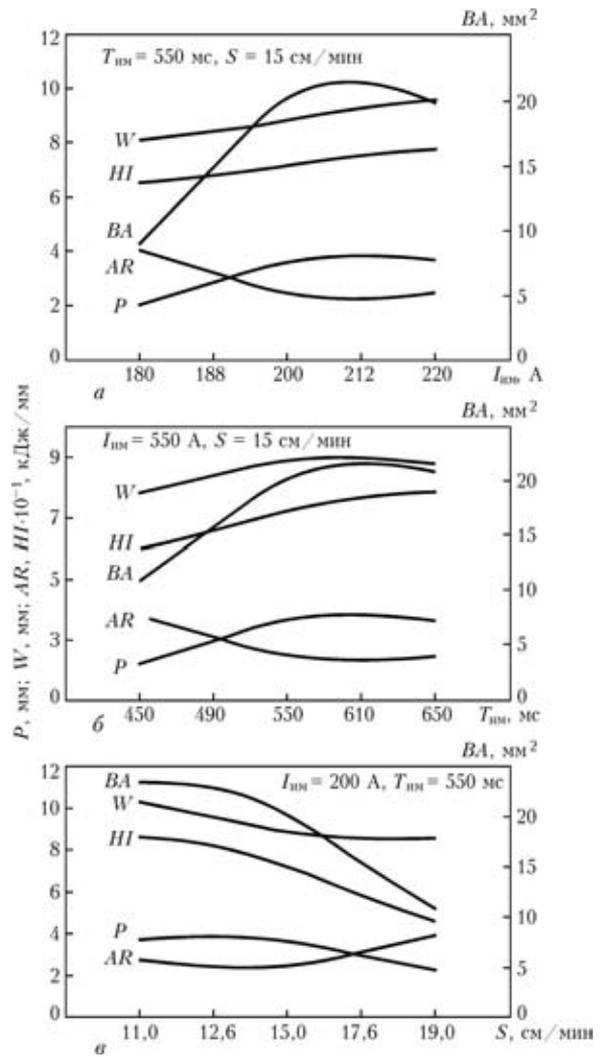


Рис. 5. Влияние тока импульса  $I_{им}$  (а), длительности импульса  $T_{им}$  (б), скорости сварки  $S$  (в) на параметры валика

повышении  $T_{им}$  до 610 мс, а затем снижается менее значительно — до 2,41, т. е. проявляется та же тенденция, что и на рис. 4. Для площади валика  $BA$  характерна та же тенденция, что и для  $I_{им}$  относительно  $BA$  (см. рис. 5), но при меньших значениях, что свидетельствует о меньшем влиянии  $T_{им}$  на  $BA$  по сравнению с  $I_{им}$ . Следовательно, увеличение длительности тока импульса  $T_{им}$  ока-

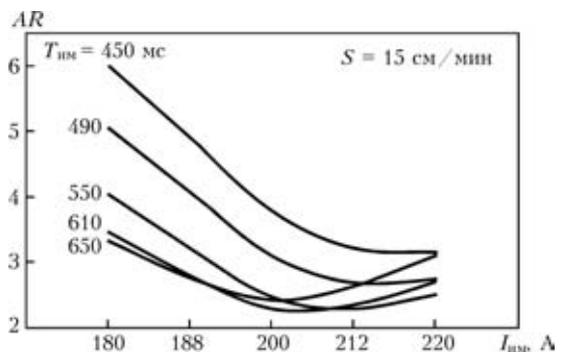


Рис. 6. Влияние взаимодействия тока импульса  $I_{им}$  и длительности импульса тока  $T_{им}$  на коэффициент формы  $AR$

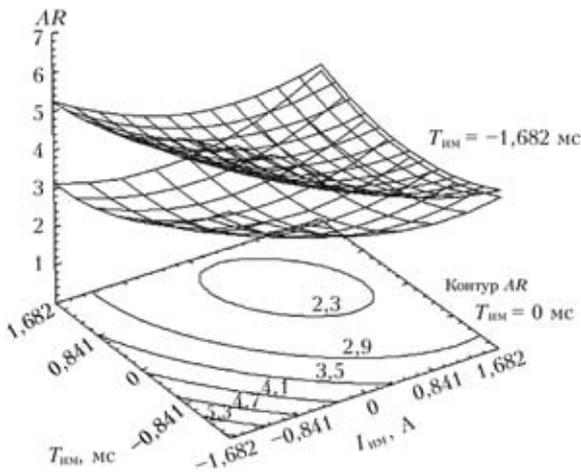


Рис. 7. Поверхность отклика и контурный график при взаимном влиянии тока импульса  $I_{им}$  и длительности импульса тока  $T_{им}$  на коэффициент формы  $AR$

зывает положительное влияние на  $W$  и  $HI$  и неоднозначное на  $BA$  и  $P$ .

Прямое влияние скорости сварки  $S$  на параметры валика шва и тепловложение  $HI$ . Из рис. 5, в видно, что скорость сварки  $S$  повышается от 11 до 15 см/мин,  $HI$ ,  $AR$  и  $BA$  снижаются не так значительно,  $P$  немного повышается. Дальнейшее повышение  $S$  свыше 15 см/мин приводит к значительному увеличению  $P$ ,  $BA$  и  $HI$ . По мере роста  $S$  от 11 до 15 см/мин ширина валика первоначально уменьшается от 10,276 до 8,87 мм, а при  $S \geq 15$  см/мин никакого значительного изменения ширины валика не наблюдается. При повышении  $S$  до 15 см/мин коэффициент формы шва первоначально снижается не так значительно — от 2,77 до 2,46, при  $S \geq 15$  см/мин  $AR$  возрастает до 3,927. Очевидно, что при повышении  $S$  тепловложение в основной металл снижается, следовательно, плавление основного металла сокращается, что приводит к падению всех параметров валика. Первоначальное снижение  $AR$  может быть обусловлено значительным спадом  $W$  по сравнению с  $P$  при повышении  $S$  от 11 до 15 см/мин. Незначительное повышение  $AR$  при росте  $S$  свыше 15 см/мин может быть обусловлено уменьшением тепловложения, что приводит к значительному снижению  $P$  по сравнению с  $W$ . Следовательно, повышение  $S$  оказывает отрицательное влияние на  $P$ ,  $BA$  и  $W$  и положительное на  $AR$ .

Совместное влияние тока импульса  $I_{им}$  и длительности тока импульса  $T_{им}$  на коэффициент формы  $AR$  (рис. 6). Очевидно, что при повышении  $I_{им}$  от 180 до 200 А коэффициент  $AR$  значительно снижается для всех значений  $T_{им}$ , а при дальнейшем повышении  $I_{им}$  до 220 А никаких значительных изменений  $AR$  при повышении  $T_{им}$  от 450 до 490 мс не наблюдается, при  $T_{им} = 550$  мс  $AR$  повышается не так значительно. Исходная тенденция снижения  $AR$  может быть обусловлена пре-

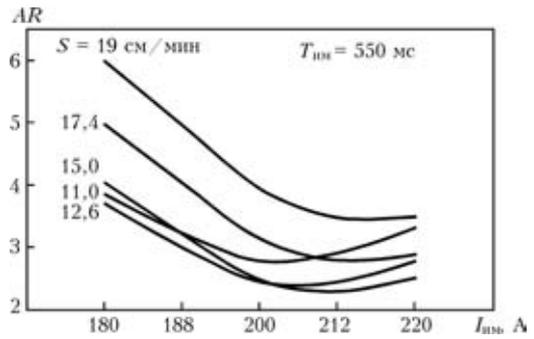


Рис. 8. Влияние тока импульса  $I_{им}$  и скорости сварки  $S$  на коэффициент формы  $AR$

обладающим влиянием  $I_{им}$  на  $AR$ , а дальнейшее повышение  $AR$  может быть обусловлено преобладающим влиянием  $T_{им}$  на  $AR$ . Установлено также, что  $AR$  является максимальным, когда  $I_{им}$  и  $T_{им}$  находятся на минимальном уровне, и минимальным, когда  $I_{им} = 200$  А и  $T_{им} = 610$  мс, а скорость сварки 15 см/мин. Следовательно, повышение  $T_{им}$  оказывает преобладающее влияние на  $AR$  при росте  $I_{им}$  свыше 200 А, что отражается на поверхности отклика и графиках контурной поверхности (рис. 7). Поверхность отклика показывает, что  $AR$  повышается при изменении  $S$  от минимального до максимального уровня для всех значений  $I_{им}$  и  $T_{им}$ . Параметр  $AR$  максимальный, когда  $I_{им}$  и  $T_{им}$  находятся на минимальном уровне, а  $S$  — на максимальном.

Взаимное влияние тока импульса  $I_{им}$  и скорости сварки  $S$  на  $AR$ . Из рис. 8 видно, что  $AR$  максимальный, когда  $I_{им}$  и  $S$  находятся соответственно на минимальном и максимальном уровне,  $AR$  минимальный, когда  $I_{им} = 212$  А и  $S = 15$  см/мин. Очевидно, что по мере повышения  $I_{им}$  от 180 до 200 А коэффициент  $AR$  вначале существенно снижается при всех значениях  $S$ , а при  $I_{им} \geq 200$  А по мере снижения  $S$  от 15 до 11 см/мин  $AR$  повышается менее значительно, в то время как  $AR$

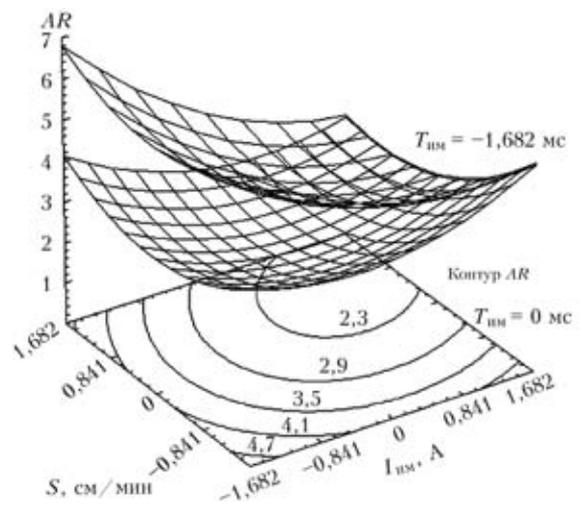


Рис. 9. Поверхность отклика и контурный график при взаимном влиянии тока импульса  $I_{им}$  и скорости сварки  $S$  на коэффициент формы  $AR$



становится более или менее стабильным, когда  $S$  снижается от 19 до 17,4 см/мин. Следовательно, повышение  $I_{им}$  от 180 до 200 А оказывает преобладающее влияние на  $AR$ , в то время как снижение  $S$  оказывает преобладающее влияние на  $AR$  при повышении  $I_{им}$  от 200 до 220 А. Это влияние также наглядно представлено на рис. 9, где показана поверхность отклика и контурные графики для совместного воздействия  $I_{им}$  и  $S$  на  $AR$ . Очевидно, что  $AR$  снижается при изменении  $T_{им}$  от минимального до максимального при всех значениях  $I_{им}$  и  $S$ ,  $AR$  максимально, когда  $I_{им} = 180$  А,  $T_{им} = 450$  мс и  $S = 19$  см/мин.

### Выводы

1. Для наглядного представления влияния параметров процесса импульсной дуговой сварки вольфрамовым электродом в защитных газах на параметры валика шва при сварке тонких листов нержавеющей стали (304L) можно использовать метод поверхности отклика.

2. Для разработки математических моделей прогнозирования геометрии валика в пределах рабочего диапазона параметров процесса использован метод пятиуровневого полнофакторного эксперимента. Установлено, что разработанная модель проплавления позволяет прогнозировать проплавление с точностью до 96 %, в то время как модели ширины валика, площади валика и коэффициента формы шва позволяют прогнозировать соответствующие параметры валиков с точностью до 98 % на основании испытания на соответствие.

3. Установлено, что ток импульса оказывает положительное влияние на ширину валика  $W$  и неоднозначное влияние на проплавление  $P$  и площадь валика шва  $BA$ . Длительность тока импульса оказывает неоднозначное влияние на  $P$ ,  $W$  и  $BA$ , в то время как скорость сварки  $S$  негативно влияет на  $P$ ,  $W$  и  $BA$ .

4. Пакет программ MATLAB может быть эффективно использован для оптимизации параметров импульсного дугового процесса при сварке тонких листов нержавеющей стали.

Mathematical models have been developed and described, which establish a relation between the controllable parameters of a pulsed welding process (pulsed current, pulse time, welding speed) and weld bead parameters (penetration, bead width, weld shape factor and weld bead area). Adequacy of models, based on the regression and dispersion analysis, is confirmed.

*Авторы выражают благодарность Всеиндийскому совету по техническому образованию и Комитету по университетским грантам за предоставление финансовой помощи для выполнения данной работы.*

1. Cornu J. Advanced welding system, TIG and related processes. — Springer-Ver., 1988. — Vol. 3.
2. Murugan N., Parmar R. S., Sud S. K. Effect of submerged arc process parameters on dilution and bead geometry in single wire surfacing // J. Mater. Proc. Technol. — 1993. — **37**. — P. 767–780.
3. Lothongkum G., Chaumbai P., Bhandhubanyong P. TIG pulse welding of 304L austenitic stainless steel in flat, vertical and overhead position // Ibid. — 1999. — **89/90**. — P. 410–414.
4. Troyer W., Tomsic M., Barhorst R. Investigation of pulsed wave shapes for gas tungsten arc welding // Welding J. — 1977. — **56**, № 1. — P. 26–32.
5. Omar A. A., Ludin C. D. Pulsed plasma-pulsed GTA arc: a study of process variables // Ibid. — 1979. — **58**, № 4. — P. 97–105.
6. Lothongkum G., Viyanit E., Bhandhubanyong P. TIG pulse welding parameters of the AISI 316L stainless steel plate at the 6–12h positions // J. Mater. Proc. Technol. — 2001. — **91/92**. — P. 312–316.
7. Leitner R. E., McElhinney G. H., Pruitt E. L. An investigation of pulsed GTA welding variables // Welding J. — 1973. — **52**, № 9. — P. 405–410.
8. Hames P., Smith B. L. Factorial techniques for weld quality prediction // Metal Construction. — 1993. — **15**. — P.128–130.
9. Adler Y. P., Markov E. V., Granovsky Y. V. The design of experiments to find optimal conditions. — М.: Mir, 1975.
10. Cochran W. G., G. M. Cox. Experimental designs. — New York: John Wiley & Sons publ., 1957.
11. Murugan N., Parmar R. S. Effects of MIG process parameters on the geometry of bead in automatic surfacing of stainless steel // J. Mater. Proc. Technol. — 1994. — **41**. — P. 381–398.
12. Gunaraj V., Murugan N. Prediction and optimization of weld bead volume for submerged arc process. Pt 1 // Welding J. — 2000. — **79**, № 10. — P. 286–294.
13. SYSTAT, Version 11, 2004, Systat Inc.
14. Montgomery D. C., Peck E. A. Introduction to linear regression analysis. — New York: John Wiley & Sons publ., 1992.
15. Jasbir S. A. Introduction to optimum design. — New York: McGraw Hill, 1989.
16. Arora J. S. Introduction of optimum design. — New York: McGraw Hill, 1989.
17. Gill P. E., Murray W. Practical Optimization. — New York: Acad. press, 1981.
18. Gunaraj V., Murugan N. Prediction and optimization of weld bead volume for submerged arc process. Pt 2 // Welding J. — 2000. — **79**, № 11. — P. 331–294.

Поступила в редакцию 13.01.2006