Оптимизиране на импулсно ВИГ заваряване на неръждаема стомана 1.4404

Теофил Ямболиев

Optimizing pulse GTA welding of austenitic stainless steel 1.4404: *Thsi work aimed carry out a design experiment for pulse GTA welding of austenitic stainless steel 1.4404 (AISI 316L). A regression equation was obtained. Based on that it could be concluded that the most influential factor on the cross section area of the weld bead was the pulse on time. The weld geometry and the NDT results covered the quality requirements of BDS ISO 5817, level B. The energy consumption of the pulse GTAW was found to be 10,6 % less than that used by the conventional GTAW for the same work.*

Keywords: *austenitic stainless steel, pulse GTAW, design analyses*

1. ВЪВЕДЕНИЕ

При заваряване на тънки метални листове без добавъчен метал от стопяване на прилепващите им краища се образува обща заваръчна вана. За да се избегне протичане на ваната е необходимо точно дозиране на количеството топлина, което постъпва в детайлите. Такава точност се осигурява при електроннолъчево, лазерно, плазмено и импулсно ВИГ /ИВИГ/ заваряване [1, 2]. Сред тях ИВИГ се отличава с най-малки разходи и достъпност [3]. Параметрите на дъгата и топлинната й мощност се контролират в тесни граници и влияят върху геометрията на шева, структурообразуването и свойствата на съединенията [1-6]. Ефективна защита от Ar гарантира химичен състав на шева, еднакъв с този на основния метал.

ИВИГ се прилага за заваряване на аустенитни стомани, напр. AISI 316L [5, 6]. Наред с традиционните, основни параметри на ИВИГ процеса са импулсен и фонов ток, относителна продължителност и честота на импулса. Подходящото съчетаване помежду им е необходимо условие за постигане на качествено съединение.

С оглед на повишения брой параметри в сравнение с ВИГ за оптимизиране на ИВИГ режим е подходящ многофакторен експеримент [7]. Провежда се на основата на предварителни данни за влиянието на параметрите върху качеството на шева. Такива данни са получени в предходно изследване върху ВИГ и ИВИГ заваряване на стомана 1.4404. Определени са границите на област, в която ИВИГ е устойчив процес [8]. Настоящата работа цели оптимизиране на режима на ИВИГ заваряване.

2. МЕТОДИКА НА ИЗСЛЕДВАНЕТО

За ИВИГ заваряване на челни съединения без подложка са използвани планки с размери 200x20x2 мм и 200x70x2 мм от аустенитна стомана 1.4404 (X1CrNiMo 17 12 2, AISI 316L) по БДС EN 10088-2 с химически състав: 0,017% C, 0,54% Si, 1,76 % Mn, 0,002 % S, 0,034 % P, 16,91 % Cr, 10,1 % Ni 2,06 % Mo, 0,045 % N. Планките са разкроени на гилотина, обезмаслени с ацетон и прихванати, така че заваръчната междина е близка до нула. За осигуряване на равнинност и газова защита за корена на шева планките се закрепват върху приспособление. Заварява се без добавъчен метал. За запалване и извеждане на дъгата се използват технологични планки.

Използвани са токоизточник Kempi Mastertig 2300 MLS^{TM} ACDC и ториран W-електрод с диаметър 2,4 мм и ъгъл на заточване 30°. Дължината на дъгата е 2 мм. Газовата защита е с Ar с дебит 6,5 л/мин за лицевата страна и 5,5 л/мин за корена на шева. Диаметърът на газовата дюза е 12 мм, а скоростта на заваряване – 3,5 мм/с.

Въз основа на изискванията към планирания експеримент [7] и резултатите от предходни изследвания [5-9] променливи фактори са: импулсен ток $I_и$, фонов ток $I_ф$, относителна продължителност $t_и/T$ и честота f на импулса.

Матрицата за планиране е представена в табл. 1. Факторите – 4 бр., се изменят на две нива. За x_4 е прието $x_4=x_1x_2x_3$ с определящ контраст $1=x_1x_2x_3x_4$. За да се

намали броят на опитите, е възприет ДФЕ 2^{4-1}. Всеки опит е изпълнен по 2 пъти за определяне дисперсията на паралелните опити с по-малка грешка, табл. 2. Избраният план позволява да се построи линеен модел от вида:

$$y=b_0+\Sigma b_i x_i, \qquad (1)$$

където: y - функция на отклика; b_0 – свободен член; b_i – коефициент на уравнението; i=1÷4 – брой на факторите.

Таблица 1 Матрица за планиране на експеримента

Фактор	$l_и$, а	$l_ф$, а	$t_и$/T	f, хц
Означение	x_1	x_2	x_3	x_4
Основно ниво	167	52	0,49	3
Интервал на изменение	3	2	0,02	2
Горно ниво	170	54	0,51	5
Долно ниво	164	50	0,47	1

Функция на отклика е площта на напречното сечение на шев с пълен провар. Определя се, като шев от шлиф се обхожда с функцията Line в SolidWorks, екструдира се и се отчита площта му. Установено е, че така се допуска незначителна грешка - 0,8-1% [10]. Планът позволява движение по направление на градиента [8]. За намаляване на случайните грешки е използвана рандомизация [7, 10]. Статистическата обработка на данните е извършена по [7].

3. РЕЗУЛТАТИ И АНАЛИЗ НА РЕЗУЛТАТИТЕ

3.1 ДРОБЕН ФАКТОРЕН ЕКСПЕРИМЕНТ 2^{4-1}

Таблица 2 съдържа плана и резултати от изпълнението на ДФЕ 2^{4-1}. Показано е изменението на факторите и техните взаимодействия, необходими за пресмятане на съответните коефициенти.

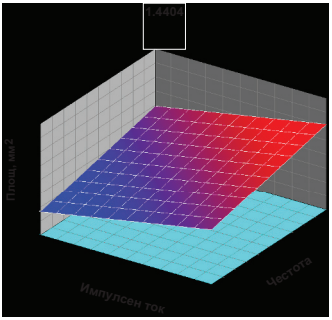
Статистическа обработка на експерименталните данни: определяне на дисперсията на паралелните опити: max S_{yu}^2=1,296, ΣS_{yu}^2=2,164; проверка за еднородността на дисперсията с критерия на Кохрен: G_{exp}=1,296/2,164=0,598, G_{tab}=0,680, α=0,05, f=n-1=2-1=1, 0,598<0,680 - дисперсията на паралелните опити е еднородна; определяне на дисперсията на опита: S^2_y=0,270, брой на степените на свобода: f1=N(n-1)=8(2-1)=8; пресмятане на коефициентите на регресия: b_0=10,5981 b_1=0,5619, b_2=0,1206, b_3=0,7031, b_4=0,5631, b_{12}=0,2294, b_{13}=0,2469, b_{14}=0,2381; проверка значимостта на коефициентите: дисперсията и средна квадратична грешка на оценките на коефициентите S_{bi}^2=0,017, S_{bi}=0,130, критерий на Стюдънт: t (0,05; 8)=2,31, доверителен интервал на коефициентите: Δb_i=0,3003. Коефициентите са значими, ако $|bi| \geq \Delta b_i$. Значими коефициенти са: b_0, b_1, b_3, b_4. Уравнение на регресия:

Таблица 2 План и резултати от изпълнение на ДФЕ 2^{4-1}

Опит №		x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	$x_1x_2=x_3x_4$	$x_1x_3=x_2x_4$	$x_1x_4=x_2x_3$	$F_{ср}$, мм^2
1	9	1	1	1	1	1	1	1	1	12,14
2	10	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	11,19
3	11	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	12,09
4	12	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	9,80
5	13	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	10,89
6	14	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	8,67
7	15	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	9,54
8	16	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	10,49

$$F=10,5951+0,5619x_1+0,7031x_3-0,5631x_4 \qquad (2)$$

Проверка за адекватност на модела по критерия на Фишер: $S^2_{неад}$=0,739293, f_2=8-4=4, $F^{изч}$= 2,7335, $F^{табл}$ (0,05; 8; 4)= 3,84; 2,7335<3,84, следователно моделът е адекватен.



Фиг. 1. Функция на отклика при x_3=0,5

Уравнението на регресия показва, че площта на шева нараства с импулсния ток и относителната продължителност, но намалява с увеличаване честотата на импулса. Тъй като коефициентите пред x_1 и x_4 са приблизително равни и имат противоположни знаци, влиянията на тези фактори се уравновесяват взаимно. Влиянието на фоновия ток и двойните взаимодействия е незначително. Следователно площта зависи изключително от относителната продължителност на импулса. Функцията на отклика при x_3=0,5 е представена на фиг. 1.

3.2 ДВИЖЕНИЕ ПО НАПРАВЛЕНИЕ НА ГРАДИЕНТА НА ФУНКЦИЯТА

Режимът на заваряване може да бъде оптимизиран чрез движение по направление на градиента на функцията F до постигане на шев с минимална площ на напречното сечение [7]. Стойностите на факторите се изменят пропорционално на коефициентите в зависимост от знака си, табл. 3. За стъпката на фактора с най-силно влияние – x_3, е прието Δ_3 =-0,01. Стъпката Δ_i, на всеки от останалите се пресмята [8, 10], закръглява се и се прибавя към основното ниво. При движение към минимума знакът на стъпката е противоположен на знака на коефициента. Факторите, чийто коефициенти са незначими, запазват основното си ниво.

Таблица 3 Движение по направление на градиента, v=3,5 мм/с

Фактор	$I_и$, а	$I_ф$, а	$t_и$/T	f, хц	Площ на шева, мм^2
Означение	x_1	x_2	x_3	x_4	
Основно ниво	167	52	0,49	3	
Интервал на вариране ΔX_i	3	2	0,02	2	
b_i	0,5619	-	0,7031	-0,5631	
$b_i.\Delta X_i$	1,6857	-	0,0141	-1,1262	
Стъпка	-1,12	-	- 0,01	0,8	
Стъпка след закръгление Δ_i	- 1	-	- 0,01	+0,5	
Мислен опит 1	166	52	0,48	3,5	-
Реализиран опит 2	165	52	0,47	4	11,12
Реализиран опит 3	164	52	0,46	4,5	10,40
Мислен опит 4	163	52	0,45	5	-
Мислен опит 5	162	52	0,44	5,5	-
Реализиран опит 6	161	52	0,43	6	9,57
Реализиран опит 7*	160	52	0,42	6,5	8,38
Реализиран опит 8	159	52	0,41	7	непровар

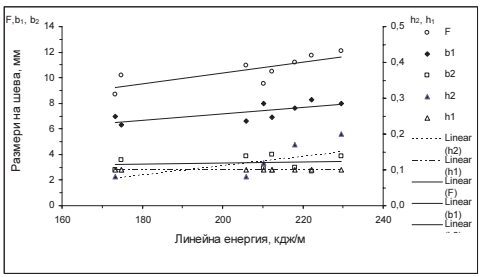
От предвидените са изпълнени 5 бр. опити, табл. 3. Площта на шева намалява до опит № 7, след който възниква непровар. За минимална площ е приета F=8,38 мм^2 от опит № 7, чийто режим е приет за оптимален при напрежение на дъгата U=10,1 в.

Отношението на линейната енергия 154,52 кдж/м на оптималния ИВИГ режим № 7 от табл. 3, и линейната енергия 172,85 кдж/м за ВИГ

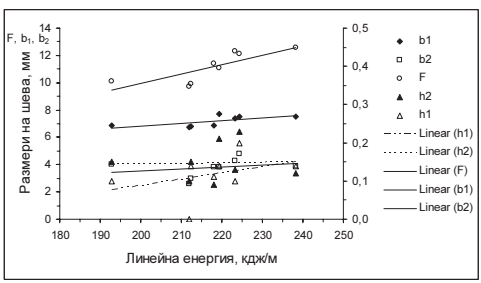
режим № 4 - I=100 а, U=11 в, v=3,5 мм/с, в табл. 3 от [7], е 0,893, т. е. чрез замяна на ВИГ с И-ВИГ заваряване може да бъде спестена ~10,6 % от вложената електроенергия за постигане на еднакъв резултат.

3.3 ГЕОМЕТРИЯ НА ШЕВА

Зависимости на размерите на шева от линейната енергия и честотата на импулса за образците от ДФЕ 2^{4-1} са представени на фиг. 2.



а



б

Видно е, че площта и ширината на шева нарастват с линейната енергия. Височината на корена се изменя в границите 0,1-0,3 мм. В табл. 4 са поместени действителните размери на шева. От сравнението им с допустимите по БДС ISO 5817 следва, че изискванията на най-високото ниво В са удовлетворени.

На фиг. 3, а е показана макроструктурата на заварено съединение, получено на режим № 11 от табл. 2, а на фиг. 3, б - от оптималния режим № 7, табл. 3. В първото съединение коренът на шева е провиснал и при променливо натоварване може да причини надрезно действие. Във второто съединение провисването е несъществено и не създава концентрация на напрежение. Налице е плавен преход към основния метал.

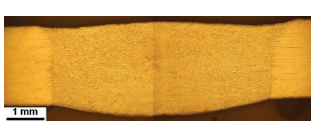
Фиг. 2. Зависимост на размерите на шева от линейната енергия и честотата: а) 1 хц; б) 5 хц

Чрез рентгенова дефектоскопия на ВИГ и ИВИГ съединения бе установено, че шевът е плътен и заваръчни несъвършенства отсъстват.

Таблица 4 Действителни и допустими размери на шева по БДС ISO 5817, ниво В, мм

Размер	b_1	b_2	h_1		h_2		h_3	
	Измерен		Измерен	Допустим	Измерен	Допустим	Измерен	Допустим
макс.	8,3	4,8	0,2	<1,8	0,3	1,5	0	0
мин.	6,4	2,7	0,1		0,1	1,3		

а



б

Фиг. 3. Макроструктура на шева: а) режим № 11, q=223 кдж/м, F=12,31 мм^2; б) оптимален режим № 7, q=154 кдж/м, F=8,38 мм^2

4. ИЗВОДИ

1. Проведен е ДФЕ 2^{4-1} за ИВИГ заваряване на челни съединения без подложка от стомана 1.4404. От уравнението на регресия следва, че площта на шева зависи изключително от относителната продължителност на импулса. Влиянията на импулсния ток и честотата са противоположни и се уравновесяват взаимно, а влиянието на фоновия ток е несъществено.

2. Чрез движение по направление на градиента на функцията е постигнат оптимален режим, който осигурява шев с минимална площ на напречното сечение.

3. Геометрията на шева и резултатите от безразрушителния контрол удовлетворяват изискванията на БДС ISO 5817, ниво B.

4. Енергийният разход за ИВИГ заваряване е с 10,6 % по-нисък от този за ВИГ заваряване при равни останали условия.

БЛАГОДАРНОСТ

Авторът благодари на дипломантите си инж. М. Радинов, инж. Т. Евдокимов и инж. Зл. Узунова за участието им в провеждане на експеримента и на доц. д-р инж. Б. Гаргов за съдействие при графичното оформление. Настоящата работа е финансирана от проект по договор № 102ни051-24/2010 г. с НИС на ТУ София.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Велков, К. Технология на заваряването, ВМЕИ, София, 1987.

[2] Желев, А. Материалознание. Техника и технология, т. II: Технологични процеси и обработваемост, Булвест 2000, София, 2002.

[3] Ташков, Т. и др. Заваряване в защитна газова среда, С., Техника, 1984.

[4] Сварка в машиностроении, т. 1, под ред. Ольшанского, И., М., Машиностроение, 1979.

[5] Lothongkum, G., P. Chaumbai, P. Bhandhubanyong TIG pulse welding of 304L austenitic stainless steel in flat, vertical and overhead positions. Journal of Materials Processing Technology 89-90 (1999) 410-414.

[6] G. Lothongkum, E. Viyanit, P. Bhandhubanyong Study on the effects of pulsed TIG welding parameters on delta-ferrite content, shape factor and bead quality in orbital welding of AISI 316L stainless steel plate. Journal of Materials Processing Technology 110 (2001) 233-238.

[7] Новик, Ф. и др. Планиране на експеримента в технология на металите, София, Техника, 1981.

[8] Ямболиев, Т. Предварителни изследвания за ВИГ заваряване с импулсен ток на стомана 1.4404. J. of the Technical University Sofia, Branch Plovdiv, “Fundamental Sciences and Applications”, Vol. 17, 2012, 109-114.

[9] Leitner, R. et. An investigation of pulsed GTA welding variables, Welding Journal, 1973, 9, 405-s – 409-s.

[10] Ямболиев, Т. и др. Оптимизиране режима на импулсно ВИГ заваряване на аустенитна неръждаема стомана 1.4301. J of the TU Sofia, Branch Plovdiv, “Fundamental Sciences and Applications”, Techsys 2011, Vol. 16, 2011, 249-254.

За контакти:

Доц. д-р инж. Теофил Ангелов Ямболиев, кат. “МТТ”, ТУ София, филиал Пловдив, „Ц. Дюстабанов” 25, 4000 Пловдив, тел.: +359-32 659 622; tiamb@tu-plovdiv.bg

Докладът е рецензиран