

УДК 621. 791.75

Власов А. Ф., Кущій А. М.**ВИСОКОПРОДУКТИВНИЙ СПОСІБ ВИГОТОВЛЕННЯ
СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ**

При зварюванні встик з обробленням кромки продуктивність процесу обумовлює кількість електродного металу, наплавленого в одиницю часу. У цьому випадку об'єм розплавленого основного металу може бути мінімальним. При зварюванні встик без оброблення кромки важливим є проплавлення основного металу на задану глибину (часто максимальну), а кількість електродного (присадочного) металу повинно бути достатнім для заповнення наявного зазору й утворення деякого посилення шва. При зварюванні швів, що утворюються в основному за рахунок електродного (присадочного) металу, продуктивність процесу визначає миттєва продуктивність розплавлення електрода, коефіцієнт розплавлення, коефіцієнт наплавлення і швидкість зварювання.

Миттєва продуктивність розплавлення електрода, q_p у загальному виді дорівнює:

$$Q_p = IU\eta_e / S_K - S_T, \quad (1)$$

де I – сила зварювального струму, А;

U – напруга дуги, В;

η_e – ефективний ККД процесу нагрівання електрода дугою;

S_K – тепломісткість розплавлених капель електродного металу;

S_T – тепломісткість електродного металу при температурі T_m нагрівання електрода при проходженні струму.

Коефіцієнт розплавлення електрода визначається за залежністю:

$$\alpha_{p.e} = \frac{G_e \cdot 3600}{I_H \cdot t}, \quad (2)$$

де $\alpha_{p.e}$ – коефіцієнт розплавлення електрода, г/А·год;

G_e – сума мас розплавленого електродного стержня и металевих складових покриття, г;

I_H – величина струму наплавки, А;

t – час горіння електрода, с.

Коефіцієнт наплавлення визначається за залежністю:

$$\alpha_H = \frac{G_{H.M} \cdot 3600}{I_H \cdot t},$$

де α_H – коефіцієнт наплавлення, г/А·год;

$G_{H.M}$ – маса наплавленого металу, г.

Швидкість зварювання при даному перетину оброблення буде пропорційна продуктивності наплавлення:

$$V_{nl} = L_e / t, \quad (3)$$

де V_{nl} – лінійна швидкість плавлення електрода, мм/с;

L_e – довжина розплавленого електрода, мм.

$$V_{\text{нок}} = G_{\text{р.нок}} / t, \quad (4)$$

де $V_{\text{нок}}$ – масова швидкість плавлення покриття електроду, г/с;

$G_{\text{р.нок}}$ – маса розплавленого покриття, г.

Таким чином, критерієм продуктивності є добуток $\alpha_n \cdot I$. Підвищення швидкості зварювання можливо як за рахунок збільшення коефіцієнта наплавлення, так і сили зварювального струму.

Ручне дугове зварювання покритими електродами залишається одним із широко застосовуваних технологічних процесів при виготовленні, монтажу й ремонту більшості зварних сталевих конструкцій [1, 2].

Підвищення продуктивності ручного дугового зварювання (наплавлення) і пошук нових видів сировини для їхнього виготовлення являється однією із головних завдань, що стоять перед розробниками зварювальних і наплавочних матеріалів.

Для зварювання низьковуглецевих і низьколегованих сталей промисловістю випускається безліч марок електродів. Однак продуктивність їх досить низька й не перевищує 2,7 кг/год.

Можливість підвищення сили зварювального струму для збільшення швидкості зварювання обмежується нагріванням електроду при проходженні струму. Надмірне нагрівання сучасних марок електродів струмом може привести до небажаних змін у складі покриття: розкладання органічних матеріалів, зростає розбризування, погіршується формування шва.

Одним з основних шляхів збільшення продуктивності ручного дугового зварювання являється введення до складу покриття електродів залізного порошку. При вмісту в електродах залізного порошку в межах 15...25 % поліпшуються їх зварювально-технологічні властивості без суттєвої зміни коефіцієнта наплавлення. Найбільша продуктивність досягається при вмісту в покритті електродів 60...70 % залізного порошку при коефіцієнті маси покриття в межах 100...200 %. Такі електроди називаються «високопродуктивними». При цьому α_n досягає 14..16 г/А·год. Підвищення α_n досягають і при введенні екзотермічної суміші в покриття. У якості екзотермічної суміші використовують залізну окалину й алюмінієвий порошок [3], гематит (92,0 % Fe_2O_3) і феротитан (32,0% Ti) [4] і ін.

Однак введення в електродні покриття значної кількості залізного порошку приводить до зниження їх пластичності, внаслідок чого для їхнього якісного виготовлення потрібне прийняття відповідних заходів: застосування сильних пластифікаторів, порошку визначеної грануляції, комбінованого рідкого скла і т. ін. У зв'язку із складністю якісного виготовлення «високопродуктивних» електродів, особливо з основним покриттям, необхідності використання джерел живлення з напругою холостого ходу 80 В, дефіцитності залізного порошку, питома вага даних електродів складає приблизно 1 % від загальної кількості застосовуваних електродів [5].

Подальше зростання випуску прогресивних марок електродів підвищеної продуктивності в нашій країні стримується дефіцитом ряду матеріалів: залізного порошку, рутилового концентрату, слюди – мусковіту, целюлози, синтетичної слюди й ін.

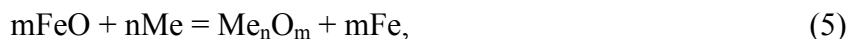
Одним з ефективних способів підвищення продуктивності (коефіцієнта наплавлення й годинної продуктивності), швидкості плавлення електродів є введення до складу покриття суміші у вигляді оксидів заліза й алюмінієвого порошку. Оксиди заліза, що вводяться в електродні покриття у вигляді окалини, дозволяють використовувати ефект збільшення насипної ваги залізного порошку і його позитивного впливу на технологічність виготовлення електродів. Крім того, у результаті протікання екзотермічної реакції при плавленні електродного покриття з екзотермічною сумішшю відновлене залізо, що утворюється, надходить у шов, підвищуючи продуктивність процесу зварювання, а тепло, що виділяється, сприяє прискоренню плавлення покриття й електрода в цілому. При недостатньому для утворення екзотермічної суміші кількості в покритті електродів оксидів заліза й елементів розкислювачів, екзотермічний процес протікає на стадії формування й переносу каплі.

Метою даної роботи була оптимізація вмісту екзотермічної суміші й товщини покриття електродів при мінімальних втратах електродного металу при визначенні максимальних значень показників процесу.

Температури, що розвиваються екзотермічними реакціями, знаходяться у пропорційній залежності від вмісту в електродних покриттях екзотермічної суміші. Температура початку екзотермічних реакцій у досліджуваних електродних покриттях фіксувалася за показниками потенціометра МР-64 із платинородій-платиновою термопарою ПП-1 і знаходилася в межах 1253-1273 К [6].

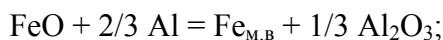
Екзотермічна суміш, застосовувана у зварювальному виробництві, являє собою механічну суміш оксидів заліза з феросплавом, що утворюється із урахуванням стехіометричних коефіцієнтів її складових. У зв'язку з тим, що у складі покриття електродів з екзотермічною сумішшю є: газшлакоутворюючий компонент (мармур), а також оксид заліза Fe_2O_3 , що міститься в окалині й рутиловому концентраті, які дисоціюють на стадії нагрівання й плавлення покриття з виділенням відповідно CO_2 і вільного кисню, то частина розкислювачів (в основному алюміній і титан) буде взаємодіяти з ними, не утворюючи екзотермічної суміші.

В загальному вигляді взаємодія елементів-розкислювачів із оксидом заліза можна представити у вигляді рівняння:



де n і m – стехіометричні коефіцієнти.

Значення стехіометричних коефіцієнтів взаємодіючих елементів окалини з алюмінієм, беручи відношення мас алюмінію, відновленого заліза й оксиду алюмінію до маси закису заліза будуть дорівнювати:



$$71,85 + 18 = 55,85 + 34;$$

$$Q_{FeO} + 0,25 Q_{FeO} = 0,7773 Q_{FeO} + 0,4727 Q_{FeO}, \quad (6)$$

де $0,25 Q_{FeO}$ – кількість алюмінію, необхідного для зв'язування долі оксиду заліза;

$0,7773 Q_{FeO}$ – кількість відновленого заліза із долі оксиду заліза;

$0,4727 Q_{FeO}$ – кількість оксиду алюмінію, що утворюється при взаємодії алюмінію із долею оксиду заліза.

Отже, кількість екзотермічної суміші від взаємодії алюмінію із оксидом заліза може бути визначена з виразу:

$$Q_{e.c}^{Al} = Q_{FeO} + 0,250 Q_{FeO} . \quad (7)$$

Кількість екзотермічної суміші від взаємодії титану, кремнію й марганцю із оксидом заліза може бути визначена з виразів:

$$Q_{e.c}^{Ti} = Q_{FeO} + 0,3333 Q_{FeO}; \quad (8)$$

$$Q_{e.c}^{Si} = Q_{FeO} + 0,1955 Q_{FeO}; \quad (9)$$

$$Q_{e.c}^{Mn} = Q_{FeO} + 0,7646 Q_{FeO} . \quad (10)$$

Розроблені статистичні моделі, що дозволяють обумовити оптимальний вміст екзотермічної суміші й товщини покриття електродів при мінімальних втратах електродного металу.

Моделювання процесу плавлення здійснювалося за допомогою програмної системи Statistica [7].

Рівняння регресії залежностей коефіцієнта розплавлення електрода α_p від кількості екзотермічної суміші Q і коефіцієнта маси електродного покриття K_n має вигляд:

$$\alpha_p = 10,55238 + 2,29644 \cdot K_n - 3,24688 \cdot K_n^2 + 0,18470 \cdot Q - 0,00240 \cdot Q^2 + 0,05875 \cdot K_n \cdot Q. \quad (11)$$

Максимальне значення коефіцієнта розплавлення електрода знаходиться при вмісту кількості екзотермічної суміші в межах 40...55 % і коефіцієнту маси покриття 0,6...1,0 (11).

Рівняння регресії залежностей швидкості плавлення електрода V_{el} від кількості екзотермічної суміші Q і коефіцієнта маси покриття електрода K_n має вигляд:

$$V_{n.l.e} = (4,68931 - 0,0004 \cdot K_n + 0,001974 \cdot Q + 0,000553 \cdot Q^2 + 0,000057 \cdot K_n \cdot Q). \quad (12)$$

Оптимальне значення швидкості плавлення електрода знаходиться при вмісту кількості екзотермічної суміші в межах 40...55 % і коефіцієнту маси покриття 0,4...0,8 (12).

Рівняння регресії залежностей швидкості плавлення покриття електрода $V_{пок}$ від кількості екзотермічної суміші Q і коефіцієнта маси покриття електрода K_n має вигляд:

$$V_{пок} = (0,475801 + 0,003526 \cdot K_n - 0,003735 \cdot K_n^2 + 0,01418 \cdot Q - 0,005248 \cdot Q^2 + 0,000411 \cdot K_n \cdot Q) 10^{-2}, \text{ м/с}. \quad (13)$$

Максимальне значення швидкості плавлення покриття електрода знаходиться при кількості екзотермічної суміші в межах 35...55 % і коефіцієнту маси покриття 0,6...0,65 і 0,9...1,0 (13).

Рівняння регресії залежностей – ККД нагрівання виробу η_e від кількості екзотермічної суміші Q і товщини покриття електрода δ_n має вигляд:

$$\eta_e = 0,76075 + 0,94813 \cdot \delta_n + 0,93457 \cdot \delta_n^2 + 0,00648 \cdot Q + 0,00007 \cdot Q^2 - 0,06425 \cdot \delta_n \cdot Q. \quad (14)$$

Оптимальне значення ККД нагрівання виробу η_e знаходиться при вмісту кількості екзотермічної суміші в межах 40...60 % і товщини покриття $(0,4...0,6) \cdot 10^{-3}$ м (14).

Рівняння регресії залежностей ККД нагрівання електрода η_e від кількості екзотермічної суміші Q і товщини покриття електрода δ_n має вигляд:

$$\eta_e = 0,37767 + 0,0059418 \cdot \delta_n + 0,008338 \cdot \delta_n^2 + 0,002299 \cdot Q + 0,00115 \cdot Q^2 - 0,04041 \cdot \delta_n \cdot Q. \quad (15)$$

Максимальне значення ККД нагрівання електрода η_e знаходиться при вмісту кількості екзотермічної суміші в межах 40...60 % і товщини покриття електрода $(0,9 \dots 1,4) \cdot 10^{-3}$ м (15).

Рівняння регресії залежностей відношення теплот Q_{xim}/Q_e від кількості екзотермічної суміші Q і товщини покриття електрода δ_n має вигляд:

$$Q_{xim}/Q_e = 9,71120 + 0,4979 \cdot \delta_n + 0,2795 \cdot \delta_n^2 - 0,01102 \cdot Q + 0,001453 \cdot Q^2 - 0,01778 \cdot \delta_n \cdot Q. \quad (16)$$

Максимальне значення Q_{xim}/Q_e знаходиться при вмісту кількості екзотермічної суміші в межах 40...50 % і товщини покриття $(0,9 \dots 1,4) \cdot 10^{-3}$ м (16).

Аналіз отриманих моделей показав, що оптимальним є вміст екзотермічної суміші в кількості 35...45 % при товщині покриття 1,6 мм на сторону.

Електрод нагрівають три джерела тепла: зосереджене джерело – зварювальна дуга (Q_1), що вводить тепло через пляму нагрівання на робочому торці електрода; теплота випромінювання й конвективної теплопередачі Q_2 .

По досягненню температури 1273 К (при вмісту в покритті електродів понад 35 % екзотермічної суміші) [6] протікає екзотермічна реакція з виділенням теплоти Q_4 , частина якої витрачається на нагрівання й плавлення покриття Q_5 , а інша частина тепла передається стрижню електрода Q_6 ; Q_7 – теплота від конвективної теплопередачі через бічну поверхню

електрода в навколишнє середовище; Q_8 – теплота, що втрачається на перегрів металу краплі; Q_9 – теплота хімічних реакцій у краплі; Q_{10} – теплота, що втрачається шляхом випромінювання з поверхні краплі; Q_{11} – теплота, витрачена на випар металу.

Миттєвий тепловий баланс плавлення електродів з екзотермічною сумішшю в покритті має вигляд:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_9 = Q_5 + Q_6 + Q_7 + Q_8 + Q_{10} + Q_{11}. \quad (17)$$

Визначення складових миттєвого теплового балансу плавлення електродів з екзотермічною сумішшю в покритті приведено у роботі [8].

Розбіжність між прибутковою й видатковою частиною балансу (табл. 1) складає $\approx 4\%$, що, враховуючи деяке свавілля у виборі значень величин уведених у розрахунок, можна визнати задовільним.

У розрахунках умовно прийнято, що долі тепла, передані стрижнем покриттю Q_5 (від протікання струму і покриття стрижню Q_6 (від протікання екзотермічної реакції) однакові.

Таблиця 1

Тепловий баланс електродів з екзотермічною сумішшю в покритті

I, А	Один. вимір.	Прихід					Розхід						
		$Q_{I(e)}$	Q_2	Q_9	Q_4	Всього	$Q_{знок}$	$Q_{бст}$	Q_7	Q_8	Q_{11}	Q_{10}	Всього
290	Джоулі %	3126 66,3	800 17,0	86 1,8	702 14,9	4714 100	1120 24,7	2280 50,4	12 0,3	490 10,8	522 11,5	103 2,3	4527 100

Електродами діаметром 4 і 5 мм, з коефіцієнтом маси покриття 0,6...0,7, з метою перевірки їх відповідності вимогам ГОСТ 9467-75, виконувалося зварювання пластин зі сталей марок Ст3пс, 09Г2С і 10ХСНД відповідно до положень ГОСТ 9466-75. Усереднені дані механічних властивостей і хімічного складу металу швів, виконаних різними партіями розроблених електродів (табл. 2 і 3), показують, що дані електроди по механічним властивостям і вмісту в наплавленому металі сірки й фосфору повністю задовольняють вимогам ГОСТ 9467-75 до електродів типів Е46 (ЕТ-3), Е50А (ЕТ-2) і Е60 (ЕТ-4) [9].

Таблиця 2

Механічні властивості металу шва

Марка електрода за ГОСТ 9467-75	σ , МПа	σ , МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²			Примітка
					+ 20 °С	-40 °С	-60 °С	
ЕТ-2 (Е50А)	525... 570	425... 460	23,5... 28,5	58,0... 65,5	130...154	84...108	63...86	$d_{ст} = 5,0$ мм, сталь Ст3пс
	505... 570	410... 430	27,5... 31,5	60,0... 66,0	153...155	105...118	75...85	$d_{ст} = 5,0$ мм, сталь 09Г2С
	555... 600	450... 455	23,5... 31,5	55,8... 58,0	130...144	87...97	68...80	$d_{ст} = 4,0$ мм, сталь Ст3пс
	545... 555	450... 455	23,0... 26,5	56,0... 62,5	142...145	96...106	82...99	$d_{ст} = 4,0$ мм, сталь 09Г2С
ЕТ-3 (Е46)	490... 495	410... 430	28,5... 31,0	60,0... 65,0	135...138	75...90	48...60	$d_{ст} = 5,0$ мм, сталь Ст3пс
ЕТ-4 (Е60)	60,0... 65,0	460... 490	18,0... 21,0	55,0... 57,0	100...122	не визн.	не визн.	$d_{ст} = 5,0$ мм, сталь Ст3пс
	600... 610	400... 460	25,0... 29,3	62,9... 63,0	105...108	не визн.	не визн.	$d_{ст} = 5,0$ мм, сталь 09Г2С

Примітка: тип зразка на ударний вигин – VI за ГОСТ 6996-75.

Таблиця 3

Хімічний склад металу шва

Марка електрода	Вміст елементів, %						
	C	Mn	Si	Al	Ti	S	P
ЕТ-2 (Е50А)	0,10...0,12	0,71...0,90	0,15...0,25	0,01...0,04	0,04...0,09	0,023...0,030	0,028...0,033
ЕТ-3 (Е46)	0,05...0,10	0,40...0,60	0,14...0,26	0,06...0,08	0,01...0,03	0,020...0,030	0,023...0,030
ЕТ-4 (Е60)	0,10...0,13	1,31...1,49	0,28...0,35	0,020,06	0,04...0,07	0,027...0,032	0,026...0,032

Вміст газів (табл. 4) у металі, наплавленому електродами ЕТ-2, близько до значень, характерних для електродів з основним типом покриття.

Таблиця 4

Газовий склад наплавленого металу

Вміст газів					
1 см ³ /100 г			%		
оксид вуглецю	азот	водень	кисень	азот	водень
82,5	13,5	4,0	0,059	0,0169	0,00036
86,7	13,5	4,2	0,062	0,0169	0,00037

ВИСНОВКИ

Ефективним способом підвищення продуктивності ручного дугового зварювання (наплавлення) являється введення до складу покриття електродів екзотермічної суміші (окаліни, феросплавів і алюмінієвого порошку в кількостях достатніх для її утворення).

Розроблені статистичні моделі, що дозволяють визначити оптимальний вміст екзотермічної суміші й товщини покриття електродів при мінімальних втратах електродного металу при визначенні максимальних значень: коефіцієнта розплавлення електрода α_p , швидкості плавлення покриття електрода $V_{пок}$, ККД нагрівання електрода η_e , відношення теплот Q_{xim}/Q_e , оптимальних значень швидкості плавлення електрода $V_{пл.е}$ та ККД нагрівання виробу η_v .

Приведені складові експериментально визначеного миттєвого теплового балансу плавлення електродів з екзотермічною сумішшю в покритті.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Мазур А. А. Состояние и перспективы мирового и региональных рынков сварочных материалов (Обзор) / А. А. Мазур [и др.]. Материалы доклада на VIII Международной конференции "Сварочные материалы" 16–18 июня 2014 г // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6–7. – С. 39–45.
2. Шлепаков В. Н. Современные электродные материалы и способы электродуговой сварки плавлением. (Обзор) / В. Н. Шлепаков // Автоматическая сварка. – 2011. – № 10. – С. 31–35.1–8.
3. Карпенко В. М. Показатели плавления сварочных электродов с экзотермической смесью в покрытии / В. М. Карпенко, А. Ф. Власов, Г. Б. Билык // Сварочное пр-во. – 1980. – № 9. – С. 23–25.
4. Иоффе И. С. Влияние титанотермической смеси, входящей в электродное покрытие, на повышение производительности сварки / И. С. Иоффе, О. М. Кузнецов, В. М. Питерский // Сварочное пр-во. – 1980. – № 3. – С. 26–28.
5. Походня И. К. Сварочные материалы : состояние и тенденции развития / И. К. Походня // Автоматическая сварка. – 2003. – № 3. – С. 9–21.
6. Власов А. Ф. Экспериментальное определение экзотермического процесса, протекающего при нагреве и плавлении электродов / А. Ф. Власов, В. М. Карпенко, А. И. Лещенко // Вісник ДДМА : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 2(4). – С. 65–68.
7. Боровиков В. П. STATISTICA : Искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов. – СПб. : Питер, 2001. – 656 с.
8. Vlasov A. F., Makarenko N. A. Special features of heating and melting electrodes with an exothermic mixture in the coating // Welding International. – Vol. 30. – No. 9., April 2016. – P. 717–722.
9. А. с. № 737175 СССР, М. Кл. ² В 23К, 35/36. Состав электродного покрытия / А. Ф. Власов, Ю. Н. Опарин, В. М. Белая, А. А. Перепелица. – № 2541967/25-27 ; Заявл. 10.11.77.