

УДК 621 79.92

**В. Мастенко, канд. техн. наук; Б. Татарин, канд. техн. наук;
М. Підгурський, докт. техн. наук**

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

ОСОБЛИВОСТІ ЗМІНИ ВЕЛИЧИНИ ТЕПЛОВОЇ ПОТУЖНОСТІ І ПОГОННОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ РІЗНИХ СПОСОБАХ АВТОМАТИЧНОГО НАПЛАВЛЕННЯ ПІД ФЛЮСОМ

Резюме. Досліджено вплив електродугового й електрошлакового автоматичного наплавлення під флюсом одним стрічковим електродом і електрошлакового наплавлення двома стрічковими електродами, різної ширини і товщини із застосуванням різних марок флюсів, на особливості зміни теплової потужності й погонної енергії при наплавленні, а відповідно на тепловий вплив на наплавлений метал і зону термічного впливу основного металу, що призводить до структурних змін наплавленого металу, а це в свою чергу впливає на експлуатаційні характеристики біметалевого з'єднання, отриманого за допомогою наплавлення.

Ключові слова: електродугове й електрошлакове наплавлення, стрічкові електроди, флюс, ефективна тепла потужність, погонна енергія, біметалеві з'єднання, одноелектродне і двоелектродне наплавлення, структура наплавленого металу.

V. Mastenko, B Tataryn, M. Pidhurskyy

FEATURES OF THE HEAT POWER AMOUNT AND RUNNING ENERGY CHANGE UNDER VARIED METHODS OF AUTOMATIC FLUS SURFACING

The summary. The influence of the arc and electroslag flux surfacing with one strip electrode and electroslag surfacing with two strip electrodes with different width and thickness, using different types of fluxes, on the characteristics of the heat power and running energy change under surfacing and on the heat effect on the surfaced metal and the thermal area effect, on the basic metal in particular, which causes the structural changes of the surfaced metal, which in its turn, influences the operating characteristics of the bimetal joining, obtained with the help of surfacing, have been investigated.

Key words: arc and electroslag surfacing, strip electrodes, flux, efficient heat power, running energy, bimetal joining, single-electrode and two-electrode surfacing, surfaced metal structure.

Постановка проблеми. В даний час глибокі дослідження, як електрошлакового, так і дугового, стрічковими електродами і перспективність їх застосування є досить актуальними. Однак повної інформації про фізичні особливості процесів, які проходять при наплавленні, ступінь впливу параметрів режиму наплавлення на якість наплавленого металу й умови їх використання при нанесенні захисних покриттів у літературних джерелах відсутні. Тому вибір найраціональнішого способу наплавлення, із тих, які застосовують у промисловості для отримання якісного біметалевого з'єднання корпусного енергетичного устаткування є актуальним завданням в енергетичному машинобудуванні.

Аналіз останніх результатів досліджень. На сьогодні в промисловості, найширше застосовують, в основному, три різних способи автоматичного наплавлення під флюсом стрічковими електродами різного поперечного перерізу, а саме: електродугове й електрошлакове наплавлення одним стрічковим електродом і електрошлакове наплавлення двома стрічковими електродами [1-6].

Ці процеси, в міру своєї специфіки при наплавленні, супроводжуються виділенням різної теплової потужності, а відповідно і з наступним введенням в основний метал різної погонної енергії.

Відомо, що експлуатаційна надійність біметалевого з'єднання при наплавленні залежить не тільки від якості наплавленого металу, але й від характеру структурних змін зони термічного впливу основного металу, яка залежить від величини ефективної теплової потужності та погонної енергії, введеної в процесі наплавлення [7, 8]. Так як величина струму наплавлення і швидкість наплавлення при електродуговому та електрошлаковому наплавленні одним стрічковим електродом, а також і при електрошлаковому наплавленні двома стрічковими електродами товщиною 0,5 і 0,7 мм різні, то відповідно і величина теплової потужності та погонної енергії, що вводяться в наплавлений і основний метал, теж будуть різні. Крім цього, на величину цих двох характеристик процесу наплавлення впливає також і марка флюсу, тому що температура плавлення їх різна і залежить від марки флюсу.

Метою даної роботи є встановлення залежності величини ефективної теплової потужності та погонної енергії, при різних способах наплавлення, від величини поперечного перерізу стрічкових електродів та марки флюсу при виборі оптимальних параметрів режиму наплавлення для отримання якісного наплавленого металу біметалевого з'єднання.

Постановка завдання. При проведенні експериментальних досліджень вирішували завдання з визначення характеру зміни величини ефективної теплової потужності й погонної енергії від величини поперечного перерізу (товщини і ширини) електродних стрічок на різних режимах із застосуванням різних марок флюсів при наплавленні:

- а) електродуговому й електрошлаковому одним стрічковим електродом;
- б) електрошлаковому двома стрічковими електродами.

Результати досліджень. Зміна ефективної теплової потужності та погонної енергії порівнювальних процесів наплавлення стрічковими електродами призводить до зміни часу перебування наплавленого металу та металу зони термічного впливу при температурі вище A_{c1} , що призводить відповідно до значного збільшення зерна структури наплавленого металу і сприяє зміні експлуатаційних характеристик (міцності, пластичності, схильності до утворення тріщин, стійкості проти міжкристалізаційної корозії) біметалевого з'єднання, отриманого за допомогою наплавлення.

З метою оцінювання можливості застосування біметалевих з'єднань, отриманих за допомогою наплавлення одним із наведених вище способів, корпусного енергетичного устаткування для забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик, згідно з технічними вимогами на кожен конкретний виріб, проводили порівняння отриманих експериментальних даних величини теплової ефективної потужності, що виділяється в процесі наплавлення при застосуванні різних марок флюсів і стрічкових електродів різного перерізу.

Ефективну теплову потужність процесів наплавлення розраховували за формулою [8, 9]

$$q_e = I \cdot U \cdot \eta_e, \quad (1)$$

де q_e – ефективна теплова потужність, Дж/с; I – струм наплавлення, А; U – напруга, В; η_e – ефективний ККД нагрівання виробів, який залежить від способу наплавлення.

При одноелектродному дуговому і двоелектродному електрошлаковому наплавленні стрічковими електродами ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) процесів наплавлення приймали при розрахунках – 0,9 [8, 9, 10, 11]. Для розрахунку

теплової потужності та погонної енергії процесів одноелектродного електрошлакового наплавлення стрічковими електродами ефективний ККД нагрівання вибирали в межах 0,8 – 0,95 [8, 9, 10, 11], а саме, 0,85. Це пов'язано з тим, що при електрошлаковому наплавленні одним стрічковим електродом шлакова ванна знаходиться позаду стрічкового електрода і повністю відкрита, а відповідно інтенсивніше випромінює тепло, що значно підвищує теплові втрати, пов'язані з випромінюванням тепла.

Критерієм, що характеризує особливості кристалізації наплавленого металу і зміни структури в зоні термічного впливу основного металу, є тривалість нагрівання вище температури A_{c3} , швидкість охолодження, що залежать від ряду факторів, основним з яких є величина погонної енергії [8]. У зв'язку з тим визначали величину погонної енергії для різних способів наплавлення стрічковими електродами різного перерізу із застосуванням різних марок флюсів за формулою [8, 9]

$$q_n = q_e / V_H, \tag{2}$$

де q_n – погонна тепла енергія, Дж/м; q_e – ефективна тепла потужність, Дж/с; V_H – швидкість наплавлення, м/год.

Розрахунки теплової потужності та погонної енергії для різних способів наплавлення стрічковими електродами різного поперечного перерізу і під різними марками флюсів виконували виходячи з того, що в кожному конкретному випадку процес наплавлення здійснюється на оптимальних параметрах режиму, наведених у табл.1 і 2.

Таблиця 1 – Параметри режимів наплавлення одним стрічковим електродом під різними марками флюсів при дуговому й електрошлаковому наплавленні, які використовують для розрахунку ефективної теплової потужності та погонної енергії

Переріз стрічкового електрода		Спосіб наплавлення стрічковими електродами різного перерізу								
		Одноелектродне дугове наплавлення під флюсами марок ОФ–10, ФЦ–18				Одноелектродне електрошлакове наплавлення під флюсом марки ОК Flux 10.10				
δ , мм	δ , мм	I , А	U^* , В	V_H , м/год	l_e , мм	I , А	U , В	V_H , м/год	l_e , мм	l_{ϕ} , мм
20	0,5	200 – 250	34 – 36 32 – 34	6–8	35	–	–	–	–	–
	0,7	250 – 300		8–10		–	–	–	–	–
30	0,5	300 – 350		6–8		600 – 620	24–26	14–16	35	30
	0,7	350 – 400		8–10		800 – 850		18–20		
40	0,5	450 – 500		6–8		810 – 860		14–16		
	0,7	500 – 550		8–10		1100 – 1150		18–20		
50	0,5	550 – 600		6–8		1000 – 1050		14–16		
	0,7	600 – 650		8–10		1350 – 1400		18–20		
60	0,5	650 – 700		6–8		1200 – 1250		14–16		
	0,7	750 – 800		8–10		1650 – 1700		18–20		
65	0,5	700 – 750		6–8		1300 – 1350		14–16		
	0,7	800 – 850		8–10		1800 – 1900		18–20		
80	0,5	900 – 950	6–8	1600 – 1650	14–16					
	0,7	950 – 1050	8–10	2200 – 2300	18–20					
100	0,5	1100 – 1200	6–8	2000 – 2100	14–16					
	0,7	1200 – 1300	8–10	2750 – 2850	18–20					

*— чисельник — напруга, що використовується при наплавленні під флюсом марки ОФ–10;

знаменник — напруга, що використовується при наплавленні під флюсом марки ФЦ–18.

На основі аналізу отриманих розрахункових даних про характер зміни теплової потужності процесу і погонної енергії при наплавленні побудовані відповідні

залежності, що дозволяють зробити порівняльний аналіз цих характеристик для різних способів наплавлення, перерізу стрічкових електродів і марок флюсів.

Таблиця 2 – Параметри режимів наплавлення двома стрічковими електродами під різними марками флюсів при електрошлаковому наплавленні, які використовують для розрахунку ефективної теплової потужності та погонної енергії

Переріз стрічкового електрода		Двоелектродне електрошлакове наплавлення під флюсом марок ОФ–10 і ОК Flux 10.10				
b , мм	δ , мм	I , А	U^{**} , В	V_H , м/год	d , мм	l_e , мм
20	0,5	–	38 – 40 24 – 26	–	–	–
	0,7	400 – 450		18 – 20	15	35
30	0,5	570 – 630		14 – 16	12	
	0,7	650 – 760		18 – 20	15	
40	0,5	780 – 840		14 – 16	12	
	0,7	850 – 950		18 – 20	15	
50	0,5	950 – 1050		14 – 16	12	
	0,7	1150 – 1250		18 – 20	15	
60	0,5	1150 – 1250		14 – 16	12	
	0,7	1350 – 1450		18 – 20	15	
65	0,5	1250 – 1300		14 – 16	12	
	0,7	1450 – 1550		18 – 20	15	
80	0,5	1560 – 1650		14 – 16	12	
	0,7	1850 – 1950		18 – 20	15	
100	0,5	1950 – 2100		14 – 16	12	
	0,7	2200 – 2300		18 – 20	15	

** — чисельник — напруга, що використовується при наплавленні під флюсом марки ОФ–10;

знаменник — напруга, що використовується при наплавленні під флюсом марки ОК Flux 10.10.

Результати проведених експериментів при наплавленні показали, що величина ефективної теплової потужності (q_e) і погонної енергії (q_n) змінюються залежно від ширини стрічкових електродів у всіх випадках прямолінійно. При одноелектродному і двоелектродному електрошлаковому наплавленні стрічкою товщиною 0,5 мм ці дві характеристики зростають прямопропорційно збільшенню ширини стрічки (рис.1). Ефективна теплова потужність найінтенсивніше збільшується при двоелектродному наплавленні, а при одноелектродному дуговому та електрошлаковому наплавленні характер зростання теплової потужності практично ідентичний (рис.1а,б). При наплавленні стрічкою шириною 30 мм ефективна теплова потужність при двоелектродному електрошлаковому й одноелектродному дуговому (флюс марки ОФ – 10) та електрошлаковому (флюс марки ОК Flux 10.10) процесів становить 20 – 23 кДж/с; 10 – 13 кДж/с і 12 – 14 кДж/с, а при наплавленні стрічкою шириною 100 мм відповідно становить 67 – 76 кДж/с; 37 – 43 кДж/с і 40 – 45 кДж/с.

Погонна енергія при одноелектродному дуговому й електрошлаковому наплавленні, та при двоелектродному електрошлаковому зростає в усіх випадках прямолінійно, аналогічно як зростає ефективна теплова потужність (рис.1в,г). Характеристика процесів найінтенсивніше зростає при одноелектродному дуговому наплавленні під флюсом марки ОФ–10, а меншою мірою зростає при

одноелектродному електрошлаковому наплавленні під флюсом марки ОК Flux 10.10. Процес двоелектродного наплавлення стрічковими електродами займає проміжне значення. При наплавленні стрічкою шириною 30 мм погонна енергія одноелектродного дугового процесу становить 4,6 – 7,8 кДж/м, двоелектродного електрошлакового – 4,5 – 5,8 кДж/м і одноелектродного електрошлакового – 3,8 – 4,7 кДж/м, а при наплавленні стрічкою шириною 100 мм відповідно становить 16,9 – 25,9 кДж/м; 15,0 – 19,4 кДж/м і 12,2 – 16,3 кДж/м.

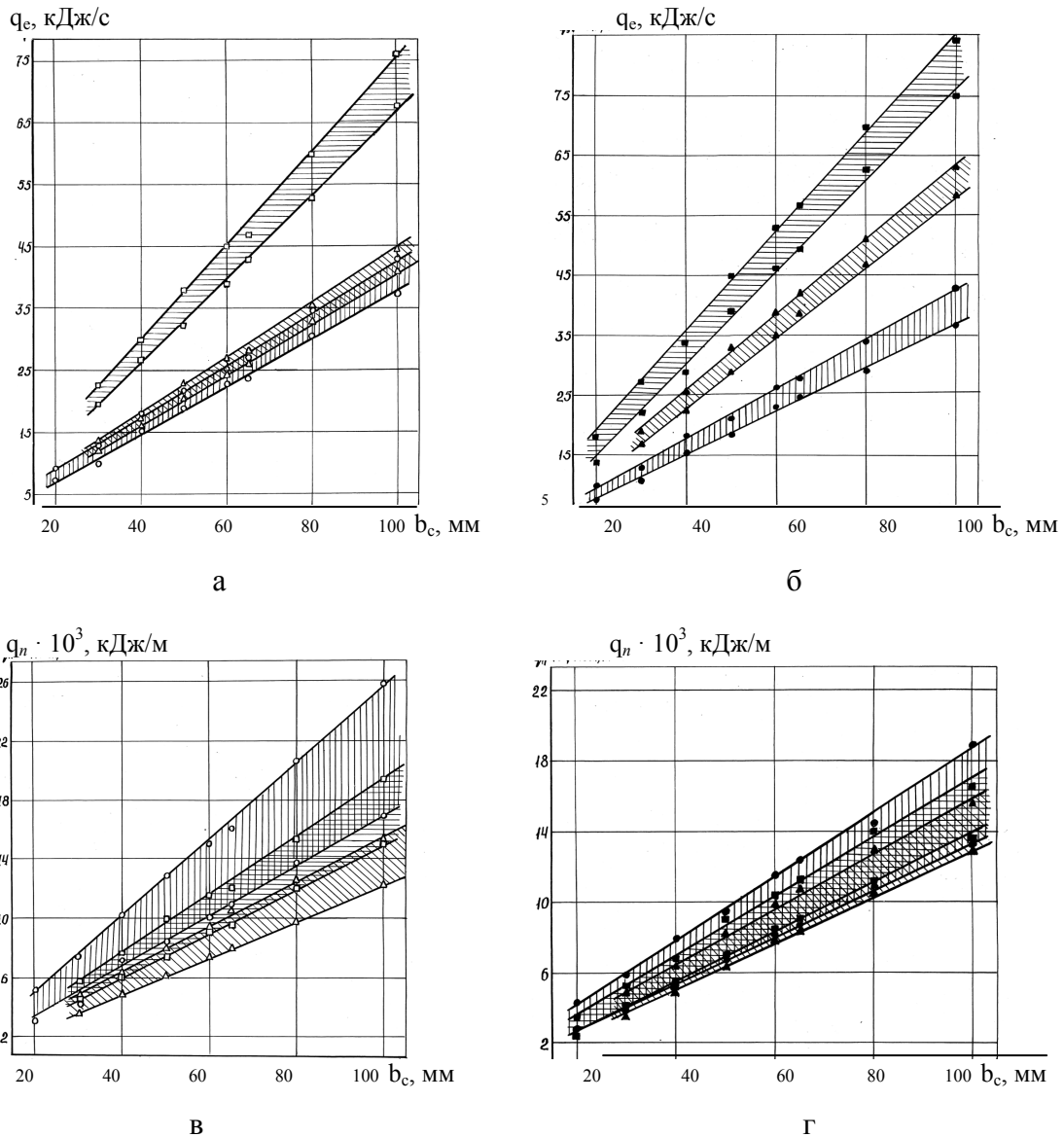


Рисунок 1 – Характер зміни величини ефективної теплової потужності (а і б) і величини погонної енергії (в і г) залежно від ширини стрічки товщиною 0,5 мм та 0,7 мм і способу наплавлення:

- , ● — одноелектродне дугове наплавлення стрічкою товщиною 0,5 мм і 0,7 мм під флюсом марки ОФ-10; режим наплавлення для стрічки товщиною 0,5 мм під флюсом марки ОФ-10; $U = 34 - 36$ В; $V_H = 6 - 8$ м/год; для стрічки $\delta = 0,7$ мм; $U = 34 - 36$ В; $V_H = 8 - 12$ м/год;
- △, ▲ — одноелектродне електрошлакове наплавлення стрічкою $\delta = 0,5$ мм і $\delta = 0,7$ мм під флюсом марки ОК Flux 10.10; режим наплавлення для стрічки $\delta = 0,5$ мм: $U = 24 - 26$ В; $V_H = 10 - 12$ м/год; для стрічки $\delta = 0,7$ мм: $U = 34 - 36$ В; $V_H = 12 - 14$ м/год;
- , ■ — двоелектродне електрошлакове наплавлення стрічкою $\delta = 0,5$ мм і $\delta = 0,7$ мм під флюсом марки ОФ-10; режим наплавлення для стрічки $\delta = 0,5$ мм: $U = 38 - 40$ В; $V_H = 14 - 16$ м/год; $d = 12$ мм; для стрічки $\delta = 0,7$ мм: $U = 38 - 40$ В; $V_H = 18 - 20$ м/год; $d = 15$ мм

Проведений порівняльний аналіз трьох способів наплавлення стрічковим електродом товщиною 0,5 мм показав, що величина погонної енергії, введеної в 90

основний метал, найменша при одноелектродному електрошлаковому наплавленні, а найбільша при одноелектродному дуговому наплавленні. Двоелектродне електрошлакове наплавлення забезпечує зміну погонної енергії в проміжних значеннях. З цього випливає, що одноелектродне електрошлакове наплавлення стрічковим електродом товщиною 0,5 мм під флюсом марки ОК Flux 10.10 забезпечує найменший тепловий вплив на наплавлений метал і зону термічного впливу основного металу й сприяє найменш інтенсивним структурним змінам у цих зонах.

При наплавленні вище вказаними способами під флюсом марок ОФ–10 і ОК Flux 10.10 із використанням стрічки товщиною 0,7 мм і при збільшенні її ширини з 20 мм до 100 мм величини ефективної теплової потужності й погонної енергії зростають також прямолінійно. Найбільш інтенсивно вони зростають при двоелектродному електрошлаковому наплавленні під флюсом марки ОФ–10, а при наплавленні одним стрічковим електродом під флюсом марки ОК Flux 10.10 вони зростають менш інтенсивно (рис. 1).

Використання стрічкового електрода товщиною 0,7 мм і шириною 30 мм при двоелектродному електрошлаковому наплавленні під флюсом марки ОФ–10 величина теплової потужності становить 22,2 – 27,4 кДж/с, при двоелектродному електрошлаковому наплавленні під флюсом марки ОК Flux 10.10 – 16,0 – 17,7 кДж/с і при одноелектродному дуговому наплавленні під флюсом марки ОФ–10 – 10,7 – 13,0 кДж/с. При наплавленні стрічковим електродом шириною 100 мм величина теплової потужності відповідно становить 75,2 – 82,8 кДж/с; 55,0 – 59,3 кДж/с і 36,6 – 42,1 кДж/с. Водночас величини погонної енергії для зазначених варіантів наплавлення близькі, причому при одноелектродному дуговому наплавленні їх значення найбільші зі значною межею змін (рис.1г). При двоелектродному електрошлаковому наплавленні стрічковими електродами товщиною 0,7 мм і шириною 30 мм величина погонної енергії змінюється в межах 4,0 – 5,5 кДж/м, при одноелектродному електрошлаковому наплавленні становить 3,6 – 4,5 кДж/м і при дуговому наплавленні – 3,8–5,8 кДж/м. При застосуванні стрічкового електрода шириною 100 мм відповідно становить 13,5–16,6 кДж/м, 13,1 – 16,2 кДж/м і 13,2 – 19,0 кДж/м.

Отже, найсуттєвіші зміни проходять у структурі наплавленого металу і в зоні термічного впливу при одноелектродному дуговому наплавленні під флюсом марки ОФ–10. Водночас можна допустити, що при наплавленні із застосуванням усіх трьох варіантів стрічковим електродом товщиною 0,7 мм і при однаковій його ширині характер структурних змін у зоні термічного впливу, напевне, близький, а, отже, експлуатаційні характеристики біметалевого з'єднання, отримані при наплавленні перерахованими вище способами, повинні бути практично близькими за величинами.

Крім цього, проводили порівняння характеру зміни величин ефективної теплової потужності та погонної енергії залежно від ширини стрічкового електрода товщиною 0,5 мм і 0,7 мм при двоелектродному електрошлаковому наплавленні під флюсом марок ОФ–10 і ОК Flux 10.10. На основі аналізу отриманих результатів встановлено, що марка флюсу, який застосовують при наплавленні, також впливає на величину ефективної теплової потужності й погонної енергії (рис. 2).

При двоелектродному електрошлаковому наплавленні стрічковими електродами товщиною 0,5 мм і шириною 30 мм під флюсом марки ОФ – 10 величина теплової потужності змінюється в межах 20,0 – 22,7 кДж/с, а під флюсом марки ОК Flux 10.10 – в межах 13,7 – 16,4 кДж/с; при наплавленні стрічковим електродом шириною 100 мм відповідно становить 66,7 – 75,6 кДж/с і 46,8 – 54,6 кДж/с (рис. 2а, б). При наплавленні стрічкою товщиною 0,7 мм і шириною 30 мм і під флюсом марки ОФ – 10 величина теплової потужності становить 22,2 – 27,4 кДж/с, а при застосуванні флюсу марки ОК Flux 10.10 відповідно становить 15,6 – 19,8 кДж/с; при застосуванні стрічки шириною 100 мм – 75,2 – 82,8 кДж/с і 52,8 – 59,8 кДж/с.

Погонна енергія при двоелектродному електрошлаковому наплавленні стрічковими електродами товщиною 0,5 мм і 0,7 мм на всьому діапазоні застосованої

ширини стрічкових електродів збільшується, при цьому більші значення спостерігаються при застосуванні флюсу марки ОФ-10 ніж флюсу марки ОК Flux 10.10. Це пояснюється тим, що для підтримання існування стійкості електрошлакового процесу необхідно використовувати, при застосуванні флюсу марки ОК Flux 10.10, меншу напругу, що й позначається на величині теплової потужності процесу при використанні різних поперечних перерізів стрічкових електродів. При двоелектродному наплавленні стрічковим електродом шириною 30 мм і товщиною 0,5 мм з використанням флюсу марки ОК Flux 10.10 величина погонної енергії при наплавленні змінюється в межах 3,1 – 4,2 кДж/м, а при наплавленні під флюсом марки ОФ – 10 – в межах 4,5 – 5,8 кДж/м; при ширині стрічки 100 мм вона знаходиться в межах 10,5 – 14,0 кДж/м і 15,0 – 19,4 кДж/м відповідно. При використанні стрічки шириною 30 мм і флюсу марки ОК Flux 10.10 величина погонної енергії становить 2,0 – 4,0 кДж/м, а при застосуванні флюсу марки ОФ-10 – 4,0 – 5,5 кДж/м; при застосуванні стрічки шириною 100 мм і використанні тих же марок флюсів відповідно становить 9,5 – 12 кДж/м і 13,5 – 16,6 кДж/м.

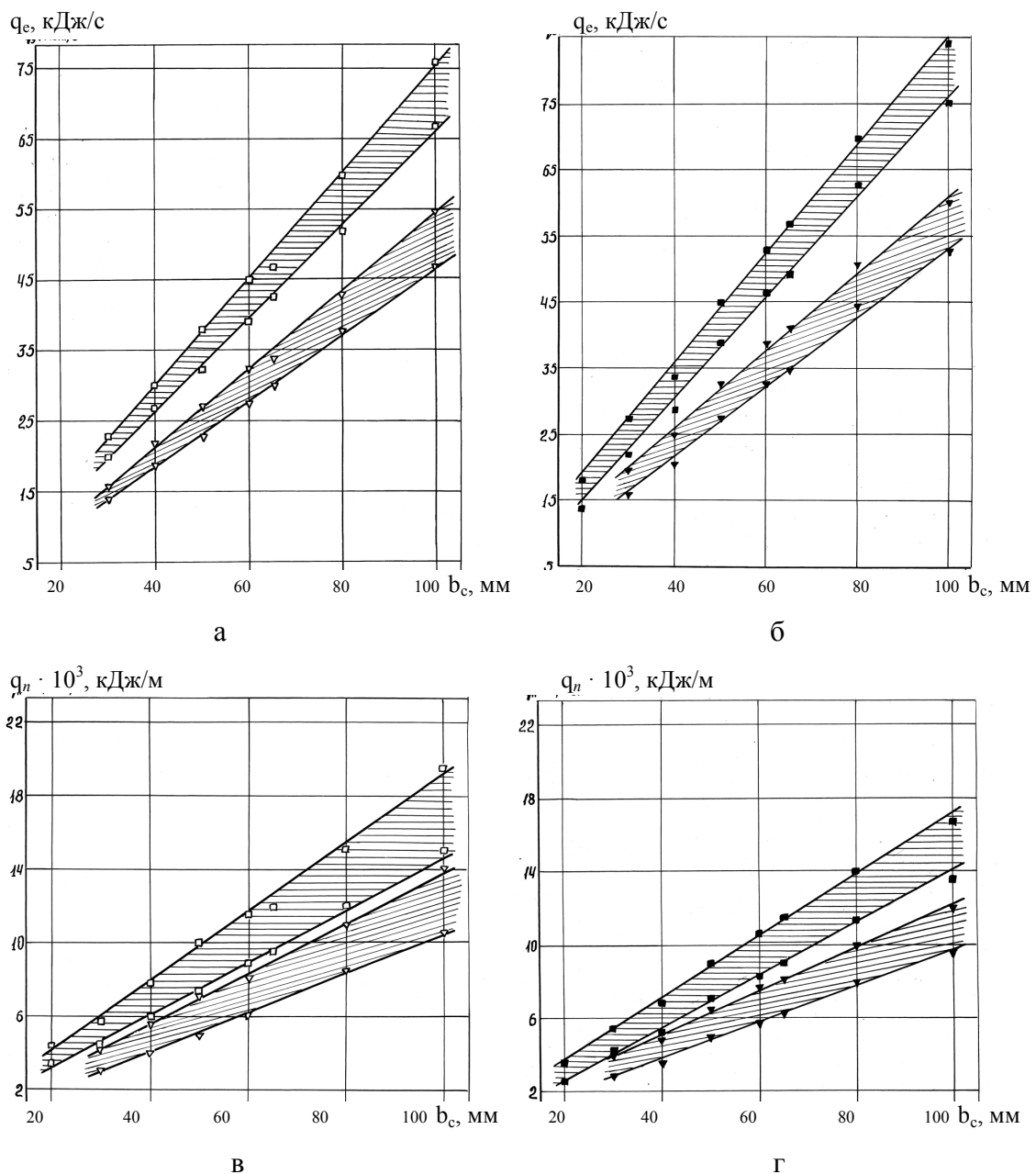


Рисунок 2 – Характер зміни величини ефективної теплової потужності (а, б) і погонної енергії (в, г) при двоелектродному електрошлаковому наплавленні стрічковими електродами товщиною 0,5 мм (а, в) і 0,7 мм (б, г) залежно від їх ширини і марки флюсу:

- , ■ — наплавлення під флюсом марки ОФ – 10 стрічковими електродами товщиною 0,5 мм і 0,7 мм відповідно;
▽, ▼ — наплавлення під флюсом марки ОК Flux 10.10 стрічковими електродами товщиною 0,5 мм та 0,7 мм

Параметри режиму двоелектродного електрошлакового наплавлення:
флюс марки ОФ – 10 — $U = 38 - 40\text{В}$;
стрічковий електрод товщиною 0,5 мм — $V_H = 14 - 16$ м/год; $d = 13$ мм;
стрічковий електрод товщиною 0,7 мм — $V_H = 18 - 20$ м/год; $d = 15$ мм;
флюс марки ОК Flux 10.10 — $U = 24 - 26$ В;
стрічковий електрод товщиною 0,5 мм — $V_H = 14 - 16$ м/год; $d = 13$ мм;
стрічковий електрод товщиною 0,7 мм — $V_H = 18 - 20$ м/год; $d = 15$ мм.

Висновки

1. На основі результатів проведених експериментальних досліджень встановлено, що величина теплової потужності й погонної енергії при наплавленні залежить від фізичних умов реалізації процесу, параметрів режиму наплавлення та поперечного перерізу стрічкових електродів.
2. Оптимальним варіантом є застосування для наплавлення флюсу марки ОК Flux10.10.
3. Аналіз отриманих результатів проведених досліджень дозволив встановити, що незважаючи на великі значення величини ефективної теплової потужності погонна енергія найнижча при електрошлаковому наплавленні як одним, так і двома стрічковими електродами.
4. Результати досліджень можуть бути використанні при виборі раціонального способу наплавлення для отримання якісного біметалевого з'єднання корпусного енергетичного устаткування.

Література

1. Neff F. High deposition rate cladding— broad strip 180mm and double strip 60mm wide. / F. Neff, P. Scherl, K. Winter, H. Ornig // Welding Institute Reprint, Reprinted from Advances in welding processes . – Harrogate. May, 1974. – P. 59-69.
2. Мастенко В. Ю. Особенности наплавки электродной лентой шириной до 200 мм. / В.Ю. Мастенко, В.Д. Ходаков, Н.А. Волосов // Автоматическая сварка. – 1981.– № 3. – С. 50-52.
3. Минато С. Способы наплавки ленточным электродом (наплавка с неглубоким проплавлением) /С. Минато, Ю. Мацусита // Ёсэцу гидзюцу. – 1981.– №2.– С. 19-25.
4. Mulder J. Influence of different elements on the susceptability for underelad cracking as determined with weld simulation tests / J. Mulder // 2 International Colloguy Welding in Nuclear Enjineering in Düsseldorf. October, 1974. – P. 19-22.
5. Neff F. Zwei neue UP-Band-SchweiBverfahren mit erhöhter Plattie-rungsleistung./ F . Neff, P. Scherl , K. Winter, H. Ornig // SchweiBtechnik-Soudure. Zürich. 1974. – N 5. – P.109-120.
6. А.с. 1660885 СССР, МКИ В 23 К 9/04. Способ двухдуговой наплавки [Текст] / Мастенко В.Ю., Рунов А.Е., Старченко Е.Г., Волосов Н.А., Татарин Б.П. (СССР). – 4714319/27-07; Заявл. 03.07.89; опубл. 07.07.91, Бюл. № 25.
7. Мастенко В. Вплив величини струму і напруги на механічні властивості металу при автоматичному наплавленні під флюсом / В. Мастенко, Б. Татарин // Вісник Тернопільського державного технічного університету. – 2006. – № 3. – С. 78-86.
8. Рыкалин Н.Н. Расчеты тепловых процессов при сварке /Н.Н. Рыкалин. – М.: Машгиз, 1951. – 296 с.
9. Рыкалин Н.Н. Производительность и эффективность процесса проплавления металла сварочной дугой / Н.Н. Рыкалин // Сб. науч. тр. – М.: АН СССР. – 1960. – С. 5-10.
10. Махненко В.И. Тепловые процессы при механизированной наплавке деталей типа круговых цилиндров /В.И. Махненко, Т.Г. Кравцов. – К.: Наукова думка, 1976. – 159 с.
11. Белоусов Ю.В. Выбор оптимальной формы ленточного электрода для широкослойной наплавки / Ю.В. Белоусов, Л.К. Лещинский, Б.Б. Сологуб // Автоматическая сварка. – № 12. – 1976. – С. 24-28.

Одержано 22.04.2010 р.