

УДК 621.791.75.01

Котик В.Т., Жданов Л.А., Стреленко Н.М.

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут". Україна, Київ

НАЯВНІСТЬ РІДКОЇ ШЛАКОВОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ АВТОМАТИЧНОМУ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ

Анотація

Проведений аналіз та розрахунки можливості існування шлакової оболонки навколо дугового розряду при автоматичному зварюванні під флюсом. Проведено порівняння результатів теоретичних розрахунків з результатами експериментів по визначенню маси рідкого флюсу поза дугою. Результати теоретичних розрахунків та експериментальних даних підтверджують наявність існування рідкої шлакової оболонки навколо дугового розряду при автоматичному зварюванні під флюсом.

Abstract

The analysis and calculations of an opportunity of existence of a slag environment around of the arc category is lead at automatic welding under a flux. Comparison of results of theoretical calculations with results of experiments by definition of weight of liquid slag behind an arch is lead. Results of theoretical calculations and experimental the data confirm existence of a liquid slag environment around of the arc category at automatic welding under a flux.

Винайдений в середині минулого століття спосіб автоматичного зварювання під флюсом і по сьогоднішній час знаходить широке використання, особливо при виготовленні відповідальних конструкцій, завдяки високій якості та надійності зварних швів, що отримують цим способом. Висока якість металу шва гарантується насамперед надійним захистом області горіння дуги від навколишнього середовища. Такий захист забезпечується рідким шлаком, що покриває з усіх боків область горіння дуги, головну та хвостову частини зварювальної ванни, виключаючи, практично, попадання повітря в дугу. Тому зварювання під флюсом широко використовується на відкритих площадках, в присутності вітру та протягів. Рідкий шлак на поверхні хвостової частини ванни, а потім закристалізованого металу шва, за рахунок сил міжфазної взаємодії сприяє формуванню зовнішньої поверхні зварного шва, забезпечуючи високу якість зовнішнього вигляду швів.

Існуючі уявлення про повне вкриття дуги оболонкою рідкого шлаку, яка захищає зону дуги від повітря при дуговому зварюванні під флюсом в останній час піддаються сумніву. Зокрема в роботі [1] пропонується нова концепція особливостей фізичного процесу зварювання під флюсом, яка полягає у відсутності шлакової оболонки перед дугою.

Розглянемо шлакову оболонку, що утворюється навколо дуги, як своєрідну конструкцію, яка забезпечує теплопередачу від дуги до флюсу. При цьому оболонка зберігає свої розміри, рухаючись разом з переміщенням дуги в напрямку зварювання. Існування такої рідкої шлакової оболонки забезпечується при умові, що її товщина буде постійною:

$$\delta = \text{const}$$

Ця умова буде виконуватися, якщо при переміщенні дуги кількість розплавленого та стікаючого в зварювальну ванну з внутрішньої поверхні оболонки шлаку $G_{\text{шл.вн.}}$ буде компенсуватися переходом в рідкий стан відповідної кількості флюсу ззовні оболонки $G_{\text{шл.зв.}}$:

$$G_{\text{шл.вн.}} = G_{\text{шл.зв.}}$$

Іншими словами швидкість витрачання рідкого шлаку з внутрішньої поверхні шлакового пузиря $v_{\text{вн}}$ повинна дорівнювати швидкості його відновлення $v_{\text{зов}}$ на його зовнішній поверхні $v_{\text{вн}} = v_{\text{зов}}$. Для підтримання квазістаціонарної форми шлакової оболонки швидкість відновлення товщини оболонки на передній стінці оболонки повинна дорівнювати швидкості зварювання. Тоді умова динамічної постійності існування шлакової оболонки пузиря має вигляд:

$$v_{\text{вн}} = v_{\text{зов}} = v_{\text{зв.}}$$

Тепло, яке передається через передню стінку оболонки витрачається на нагрів твердого флюсу

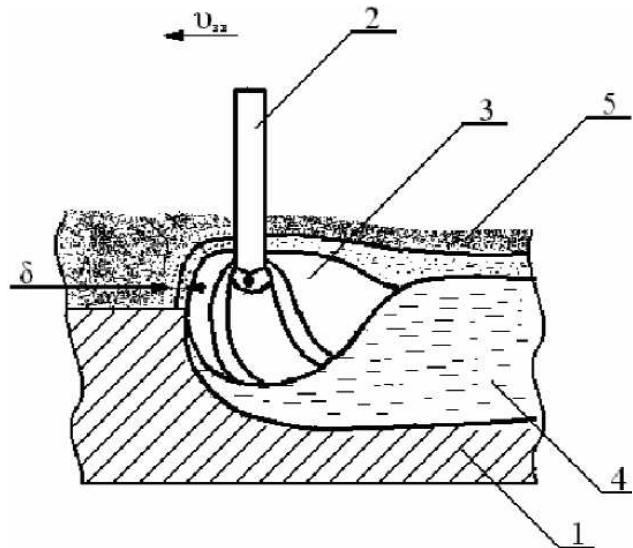


Рис. 1. Схема зони горіння дуги з наявністю рідкої шлакової оболонки:

- 1 — основний метал; 2 — електрод; 3 — дуга;
4 — рідкий метал зварювальної ванни; 5 — флюс

до температури плавлення та його розплавлення. Нехтуючи масопереносом шлаку на передній стінці оболонки, за рахунок перемішування, яке може суттєво збільшити кількість розплавленого шлаку, виразимо кількість тепла, яка передається на зовнішню частину передньої стінки оболонки за законами теплопровідності використавши рівняння Фур'є [2]:

$$Q = \frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F \tau, \quad (1.1)$$

де λ — це коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·град;

δ — товщина шлакової оболонки, м;

t_1, t_2 — температура внутрішньої та зовнішньої поверхні оболонки, °С;

F — площа оболонки через яку передається тепло, м²;

τ — час за який відбувається передача тепла через рідку шлакову оболонку, с.

Виходячи з того, що внутрішня поверхня шлакової оболонки безпосередньо контактує із зварювальною дугою, температуру її можна вважати близькою до температури випаровування (3000°С [3]), а зовнішня, яка безпосередньо дотикається до твердих гранул флюсу, близька до температури плавлення (1200°С [4]). Кількість тепла, яка проходить через шлакову оболонку Q , включає в себе тепло, яке йде на нагрівання флюсу об'ємом V до температури плавлення $t_2 (c\rho \cdot t_2 V)$, де c — теплоємність шлаку, $c = 500 \dots 1000$ Дж/кг·град, приймаємо для розрахунків $c = 750$ Дж/кг·град; ρ — густина шлаку в рухоморідкому стані $\rho = 2500 \dots 4000$ кг/м³ [4],

приймаємо для розрахунків $\rho = 3250 \text{ кг/м}^3$) та приховану теплоту плавлення флюсу ($L_s \cdot V$). В якості аналога прихованої теплоти плавлення флюсу ми приймаємо приховану теплоту плавлення оксиду кремнію, який є основним компонентом більшості плавлячих флюсів [5] $L_s = 318,6 \text{ кДж/кг} = 700 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3$.

$$Q = c\rho \cdot t_2 V + L_s \cdot V \quad (1.2)$$

Де V — можна визначити за наступною формулою:

$$V = F \cdot v_{зв} \tau \quad (1.3)$$

Тоді тепло, що йде на нагрів та плавлення флюсу має вигляд:

$$Q = c\rho \cdot t_2 F v_{зв} + L_s F v_{зв} \quad (1.4)$$

Враховуючи формулу (1.1) отримаємо:

$$\frac{\lambda}{\delta} (t_1 - t_2) F = c\rho \cdot t_2 F v_{зв} + L_s F v_{зв} \quad (1.5)$$

Швидкість відновлення оболонки шлакового пузира перед дугою:

$$v_{зв} = \frac{\lambda(t_1 - t_2)}{\delta(c\rho \cdot t_2 + L_s)} \quad (1.6)$$

З літературних джерел [6, 7] коефіцієнт теплопровідності спокійного неперемішаного шлаку в середньому складає $\lambda = 2-3 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$. Перемішування металу і шлаку газовими пузирями при кипінні металу підвищує коефіцієнт теплопровідності як прошарку шлаку так і металу. Якщо незначне перемішування шлаку підвищує коефіцієнт теплопровідності до $4-6 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$, то перемішування шлаку при активному обезвуглецюванні металу призводить до збільшення коефіцієнта теплопровідності шлаку до $100 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ [7]. Таким чином з літературних даних найбільш невизначеною величиною є теплопровідність рідкого шлаку, яка може змінюватися на декілька порядків. З метою конкретизації значення коефіцієнта теплопровідності шлаків нами було розраховано значення теплопровідності для рідкого оксиду кремнію по наступній формулі [8]:

$$\lambda = 0,093N(T_{пл}\rho)^{0,5} / M^{\frac{5}{6}} \quad (1.7)$$

де λ — коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт/м} \cdot \text{град}$; N — число атомів в молекулі; $T_{пл}$ — температура плавлення, К ; ρ — густина, кг/м^3 ; M — молярна маса.

Відповідно отримано значення коефіцієнта теплопровідності $\lambda = 17 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$. Враховуючи, що в формулі (1.6) присутні дві невідомі величини (δ і $v_{зв}$) нами був проведений розрахунок швидкості зварювання для різних значень коефіцієнта теплопровідності та товщини шлакової оболонки δ . Результати розрахунків приведені в таблиці 1 та на граф. 2.

Таблиця 1

Залежність швидкості зварювання від товщини оболонки δ при $\lambda = 4; 17; 100 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$

λ , Вт/м·К	δ , м	$1 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$
4	$v_{зв}$, м/г	5,76	2,97	1,9	1,4	1,2
17	$v_{зв}$, м/г	25,32	12,7	8,4	6,3	5,06
100	$v_{зв}$, м/г	144	74	49	35	30

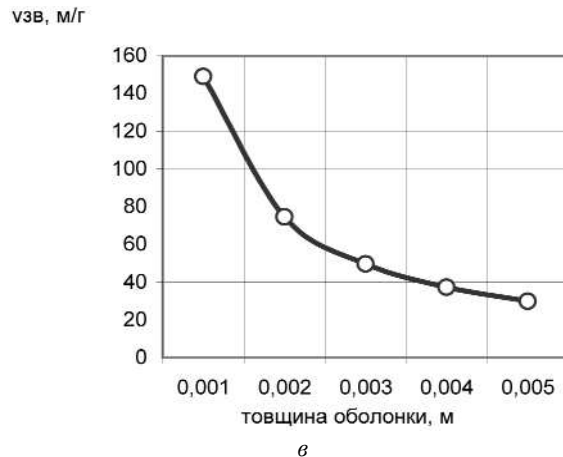
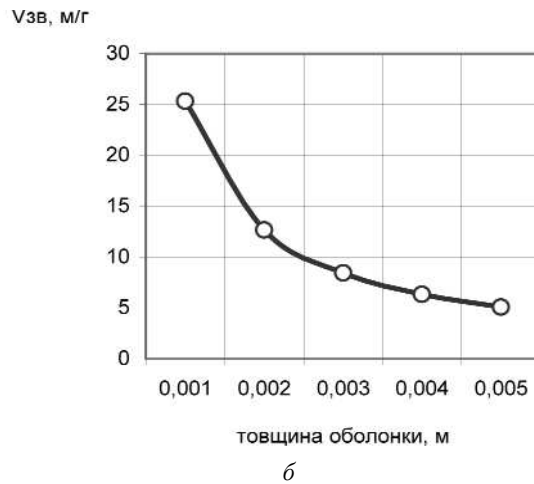
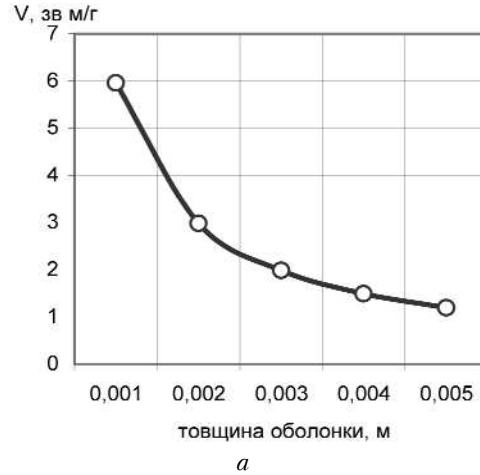


Рис. 2. Залежність швидкості зварювання від товщини оболонки δ для $\lambda = 4 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ (а), $\lambda = 17 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ (б), $\lambda = 100 \text{ Вт/м} \cdot \text{град}$ (в)

Таким чином, при використанні коефіцієнта теплопровідності $\lambda = 4$ Вт/м·град швидкість зварювання приблизно на порядок менша ніж реально існуюча, а при $\lambda = 100$ Вт/м·град – в 3–4 рази більша реальних.

Для оцінки правильності підходу до процесів передачі тепла та теплофізичних характеристик нами були розраховані можливі кількості рідкого шлаку в хвостовій частині зварювальної ванни та порівнянні з експериментальними даними, отриманими автором роботи [1, 9], в якій відзначається аномальний характер розподілення маси шлаку по поверхні зварювальної ванни з максимумом в її хвостовій частині і відсутністю шлаку перед дугою. В роботі використовувалася методика викидування металу та шлаку зварювальної ванни у відповідні кармани довжиною 15 мм, що дозволяло після відділення шлаку від металу визначити вагу шлаку на різних ділянках ванни. Зварювання проводилося під флюсами АН-60, АН-26С, АН-15М і швидкістю зварювання 21 м/г.

Нами відповідно були отримані розрахункові дані по розподіленню маси рідкого шлаку на поверхні зварювальної ванни на ділянках пропорційних довжині карманів. Товщина оболонки рідкого шлаку поза дугою містить в собі товщину оболонки, яка утворилася перед дугою (δ) та додаткову товщину рідкого шлаку (δ_1), що утворилася за рахунок проходження тепла через шлакову оболонку на протязі часу за який дуга проходить один карман (τ_1). Прирівнявши рівняння (1.1) і (1.2) отримаємо:

$$\frac{\lambda}{\delta}(t_1 - t_2)F\tau = cr \cdot t_2 V + L_s \cdot V \quad (1.8)$$

Для умов поза дугою рівняння буде мати вигляд:

$$\frac{\lambda(t_1 - t_2)F\tau_1}{\delta + \delta_1} = (cr \cdot t_2 + L_s)V \quad (1.9)$$

Враховуючи, що $V = F\delta_1$ отримаємо

$$\frac{\lambda(t_1 - t_2)\tau_1}{\delta + \delta_1} = (cr \cdot t_2 + L_s)\delta_1 \quad (1.10)$$

$$(cr \cdot t_2 + L_s) \cdot \delta_1^2 + (cr \cdot t_2 + L_s) \cdot \delta_1 \cdot \delta - \lambda(t_1 - t_2)\tau_1 = 0 \quad (1.11)$$

де τ_1 – це час за який дуга проходить відповідний

карман $\tau_k = \frac{l}{v_{зв}} = \frac{15 \cdot 10^{-3}}{5,5 \cdot 10^{-3}} = 2,7$ с, швидкість зварювання $v_{зв} = 21$ м/г, l – довжина карману;

Враховуючи, що приріст шлакової оболонки відбувається від нуля до δ_1 час τ_k в розрахунках приймалося $\tau_{1p} = \frac{\tau_k}{2} = 1,35$.

Тоді, площа рідкої шлакової оболонки F у відповідному кармані визначається, як:

$$F = b \cdot l \quad (1.12)$$

А об'єм рідкої шлакової оболонки V у відповідному кармані:

$$V = F \cdot (\delta + \delta_1) \quad (1.13)$$

Тоді вага рідкого шлаку для карману: $m = V \cdot \rho$

Проведені розрахунки для різних значень коефіцієнта теплопровідності приведені в таблиці 2.

Таким чином результати розрахунку товщини рідкої шлакової оболонки перед дугою в залеж-

Таблиця 2

Номер карману		1					2				3			
λ , Вт/м·К	δ	δ	δ_1	Σ , мм	m, г	δ	δ_1	Σ , мм	m, г	δ	δ_1	Σ , мм	m, г	
4	0,3	0,3	1,35	1,65	1,6	1,65	0,88	2,5	2,4	2,5	0,69	3,19	3,1	
17	1,27	1,27	2,5	3,75	3,65	3,75	1,7	5,45	5,3	5,45	1,4	6,85	6,7	
100	7,5	7,5	4,6	12,1	11,8	12,1	3,5	15,6	15,2	15,6	3	18,6	18	

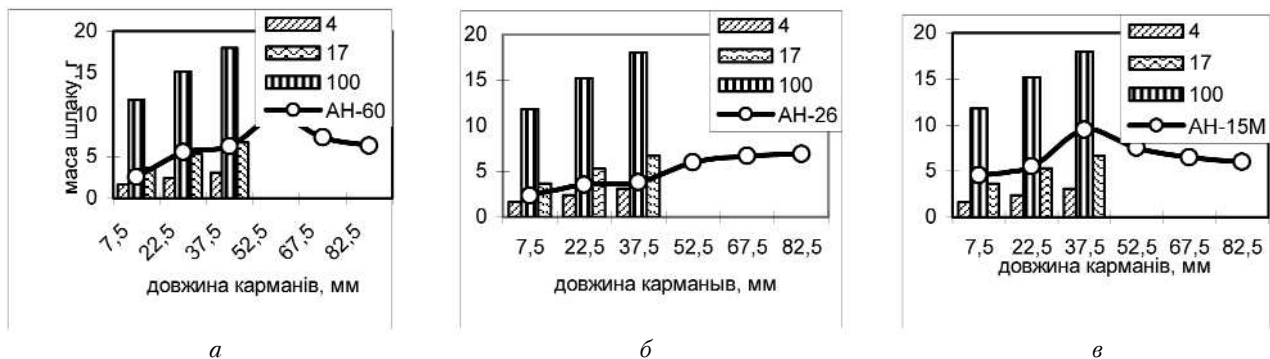


Рис. 3. Співставлення експериментальних даних по розподіленню маси рідкого шлаку вздовж зварювальної ванни при дуговому зварюванні при використанні флюсів АН-60 (а), АН-26С (б) та АН-15М (в) [1,8] з відповідними розрахунковими даними

ності від значення коефіцієнта теплопровідності можуть знаходитися в діапазоні від 0,3–7,5 мм, що дозволяє забезпечити якісне укріття шлаковою оболонкою дугового розряду від навколишнього середовища.

Теоретичний розрахунок маси рідкого шлаку поза дугою корелюється з відповідними експериментальними даними отриманими автором робіт [1, 8].

Проведені розрахунки та зв'язок їх з експериментальними даними підтверджують можливість існування шлакової оболонки навколо дугового розряду при автоматичному зварюванні під флюсом з використанням загально прийнятих режимів зварювання і не дають підстав сумніватися в існуванні класичної схеми зварювання під флюсом.

Література

1. *В.Г. Кузьменко* Особенности плавления и отвердевания флюса при дуговой сварке // Сварочное производство, 1999. — № 10. — С. 16–22.

2. *С.С. Кутателадзе, В.М. Борищанский*. Справочник по теплопередаче. Ленинград–Москва, 1959.

3. *В.Г. Кузьменко*. Экспериментальное определение размеров шлаковой и металлической ванн при сварке под флюсом // Автоматическая сварка, 1990. — № 3. — С. 13–15.

4. *Б.П. Бурyleв, Д.М. Лантев*. Измерение и расчет температур плавления сварочных шлаков// Сварочное производство, 2002. — № 2. — С. 16–21.

5. *Теплотехнический справочник* под ред. В.Н. Юренева. — М.: Энергия, 1975. — 290 с.

6. *Крижановский Р.Е.* Теплофизические свойства неорганических материалов. — Л., 1973.

7. *А.М. Бигеев*. Металлургия стали. — Металлургия, 1988.

8. *В.Г. Кузьменко*. О сплошности шлаковой оболочки при сварке под флюсом // Автоматическая сварка, 1998. — № 3. — С. 14–19.

9. *Б.Н. Бадьянов*. О новой схеме процесса дуговой сварки под флюсом // Сварочное производство, 1999. — № 11. — С. 8–11.