



Жданов Л.А.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». Україна, Київ

## ТЕРМОДИНАМІЧНИЙ МЕТОД РОЗРАХУНКУ СКЛАДУ ГАЗОВОЇ ФАЗИ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ

*На основі аналізу фізичних процесів та температурних умов у реакційній зоні зварювання під флюсом показано, що під дією плазми дугового розряду оксиди флюсу випаровуються, що призводить до їх термічної дисоціації. Початковий склад газової фази відповідає складу флюсу. Поза плазмою дугового розряду формується металургійна активна частина газової фази у якій при зниженні температури протікають процеси утворення хімічних сполук, рекомбінації та конденсації компонентів. Запропонована термодинамічна методика розрахунку складу газової фази, яка основана на процесах термічної дисоціації газоподібних сполук, дозволяє визначити парціальний тиск або мольну концентрацію елементів та з'єднань у газовій фазі. Проведений розрахунок складу газової фази для деяких промислових марок флюсів та їх загальний аналіз. Отримані розрахункові дані за складом газової фази можуть бути використані при подальшому аналізі та розрахунках металургійних процесів при зварюванні під флюсом.*

*Ключеві слова:* зварювання під флюсом, реакційна зона, газова фаза, шлак, газоподібні оксиди, термічна дисоціація, термодинамічна константа рівноваги.

### Вступ

Електродугове зварювання та наплавлення під флюсом у теперішній час є провідним способом з'єднання металевих матеріалів та нанесення наплавленого шару із спеціальними властивостями. У той же час, сам процес з точки зору фізико-хімічної взаємодії у реакційній зоні зварювання вивчений недостатньо. Пов'язано це з формальним підходом до аналізу фізико-хімічних процесів, які відбуваються у реакційній зоні зварювання під флюсом, при якому не враховується вплив газової фази. Зазвичай такий аналіз полягає в обмеженні процесів взаємодії у цій зоні міжфазною границею шлак-метал. Наслідком є розповсюджена у теперішній час класифікація флюсів за основністю флюсу-шлаку і, як наслідок, неможливість прогнозування складу металу шва. Крім цього, однобічний підхід до розгляду металургійних процесів призвів до того, що процес розробки нових флюсів часто має емпіричний характер і базується на різноманітних методах математичного аналізу. Тому дуже важливим є можливість встановлення складу газової фази, яка напряму залежить від співвідношення компонентів флюсу.

### Постановка задачі

При електродуговому зварюванні під флюсом реакційна зона зварювання складається з трьох фаз:

металевої, шлакової та газової [1–4]. Остання є найбільш високонагрітою та найбільш складно піддається експериментальним дослідженням. У той же час, саме газова фаза на думку багатьох дослідників має визначальний вплив на металургійні процеси у реакційній зоні зварювання та впливає на кінцевий хімічний склад металу шва [2, 4–8]. Ігнорування процесів, які відбуваються у газовій фазі, призвели до того, що спроби пов'язати експериментальні дані за вмістом елементів у металі шва зі складом флюсу та режимом зварювання показують доволі низьку кореляцію.

Наведені в літературі дані свідчать, що в результаті дії дугового розряду інтенсивно протікають процеси випаровування металу та флюсу. Щодо випарування металу існує теоретична модель, яка побудована на основі спроби врахування кінетики взаємодії парів металу у плазмі дуги з точки зору енергетичного бар'єру процесу окислювання пару металу для отримання залежності між швидкістю утворення оксиду пару того ж металу, вираженої через концентрації реагуючих речовин та константи рівноваги прямої та оберненої реакції [9]. Експериментальні дані спектроскопії плазми електричної дуги показують, що при введенні у плазму оксидів та фторидів в ній спостерігаються спектральні лінії елементів, які відповідають продуктам дисоціації компонентів. Встановлено, що у стовпі дуги ці елементи у радіальному та аксіальному перерізі розташовані у певній

закономірності. Сама плазма повністю дисоційована. [10]. Катодні або анодні плями можуть розташовуватися безпосередньо на флюсі, про що свідчать значення роботи виходу електронів для флюсів та шлаків (2,5...3,5 eV), яке суттєво нижче роботи виходу для чистого заліза (4,31 eV) та практично не залежить від температури в області плавлення [11]. Вплив флюсу-шлаку на процеси емісії електронів з катоду підтверджується даними аналізу перехідних процесів при зварюванні на змінному струмі [12, 13].

Наведені дані свідчать, що катодними (анодними) плямами служать зони, які займає флюс. Оксиди флюсу, які випаровуються, потрапляють у дуговий розряд і дисоціюють на компоненти, які частково іонізуються. Саме ці процеси є основою для формування початкового складу газової фази.

### Фізичні принципи покладені в основу розрахунку складу газової фази

У загальному випадку можна стверджувати, що при електродуговому зварюванні (наплавненні) під флюсом у реакційній зоні зварювання присутні три фази: металева, шлакова і газова (рис. 1, а). Металева та шлакова фази вивчені досить докладно. Щодо газової фази, то експериментальні дані за її складом обмежуються вимірюванням кількості  $CO$  та  $CO_2$ ,  $H$  та  $H_2$  у газовій фазі і парів деяких металів [6]. Розрахункових методів визначення її складу не існує.

Для створення розрахункової методики визначення складу газової фази при зварюванні під флюсом на першому етапі доцільно провести її фізичну структурування.

Газова фаза складається з двох областей, які принципово відрізняються за своїми фізичними властивостями: це плазма (дуговий розряд) та неіонізований газ. Плазма дугового розряду має дві складові:

шнур (стовп дуги) та приграничні ділянки. Далі знаходиться перехідна зона та низькотемпературна («хвостова») область, тобто неіонізований газ, який зазвичай ідентифікують з газовою фазою. Його склад безпосередньо впливає на металургійні процеси.

Експерименти за визначенням температури дуги при зварюванні під флюсом показали, що вона може змінюватися в діапазоні 6500–8000 К [14, 15]. На нашу думку це відповідає температурі приграничних ділянок дугового розряду ( $\approx 6000$  К). Температура стовпа вища і була нами оцінена у величину  $>10^4$  К. Слід відмітити, що температура стовпа (шнура) вугільної малоамперної дуги (20 А) складає 12000 К [16].

Неіонізований газ – складова газової фази є похідною від процесів, які визначаються плазмою дугового розряду. При цьому, поза дугою він через міжфазні поверхні взаємодіє із зварювальною ванною та шлаковим куполом, тобто є металургійно активною складовою. Температура плавлення сталі 1723–1793 К, шлаку 1373–1573 К, температурами кипіння сталі 2500–2800 К, шлаку  $\approx 3000$  К. Тому інтервал температур у якому доцільно проводити розрахунок складу газової фази складає 6000–2000 К.

Катодними (анодними) плямами служать зони, які займає флюс-шлак (рис. 1, б). Оксиди, які випаровуються, потрапляють у дуговий розряд і дисоціюють на компоненти, які частково іонізуються у плазмі. Дія дугового розряду на матеріали при зварюванні під флюсом нерівномірна. Основна частина енергії дугового розряду передається у передню (головну) частину реакційної зони зварювання і поглинається матеріалами, які розплавляються і перетворюються в перегріту пару, яка проходячи через плазму дуги формує газову фазу. Процеси випаровування мають характер сублимації і в значній мірі визначають кількісний склад компонентів у газовій фазі. У низькотемпературній частині реакційної зо-

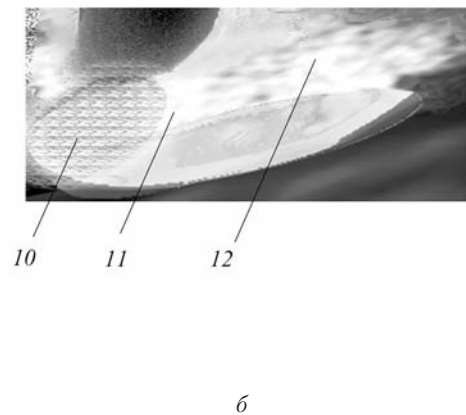
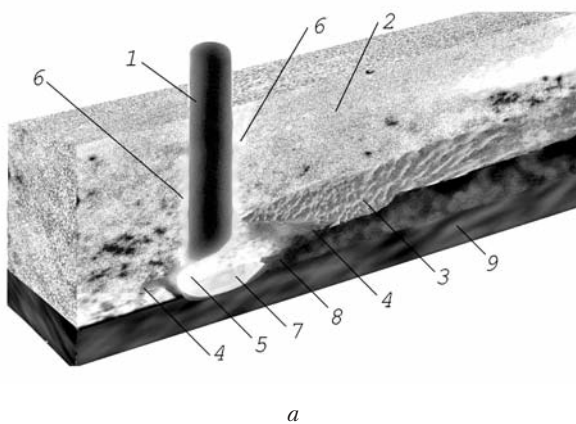


Рис. 1. Модель електродугового зварювання під флюсом:

а – реконструйована об'ємна модель [18]; б – збільшений зовнішній вигляд зони випаровування флюсу-шлаку на катоді та газової фази; 1 – електродний дріт; 2 – флюс; 3 – шлакова корка; 4 – розплав шлаку; 5, 6 – внутрішня та зовнішня складова газової фази; 7 – дзеркало зварювальної ванни; 8 – шов; 9 – основний метал; 10 – зона випаровування; 11 – перехідна зона; 12 – низькотемпературна («хвостова») область газової фази.



ни зварювання перегріта парогазова фаза охолоджується. Це приводить до того, що в ній протікають процеси утворення хімічних сполук, рекомбінації та конденсації компонентів газової фази і основні хімічні реакції, які в подальшому формують хімічний склад металу шва та вміст у ньому газів. Термічна дисоціація цих газоподібних оксидів, що спочатку під впливом дугового розряду протікає у прямому напрямку, а потім при охолодженні у зворотному, саме і формує склад газової фази при електродуговому зварюванні під флюсом.

Перенос електродного металу, який в основному відбувається поза плазмою дугового розряду та наявність пульсацій зварювальної ванни [1, 17] які пов'язані з гідродинамічними потоками у ній сприяє переміщенню неіонізованого газу, що є складовою газової фази. Ці фактори сприяють усередненню складу газової фази і дають можливість говорити про наявність у ній квазірівноваги у певних макрооб'ємах.

Для створення теоретичної схеми визначення складу газової фази при зварюванні під флюсом необхідно чітко сформулювати певні фізичні принципи, що визначають механізм надходження компонентів флюсу у газову фазу, її температурний режим та особливості формування. Ці принципи, в подальшому, будуть застосовані при формуванні термодинамічної методики розрахунку кількісного вмісту компонентів у неіонізованій, низькотемпературній області газової фази.

На основі наведених міркувань нами були введені наступні припущення:

- катодними (анодними) плямами частково або повністю служать зони, які займає флюс-шлак;
- газова фаза складається з двох областей, які принципово відрізняються за своїми фізичними властивостями: це плазма (дуговий розряд) та неіонізований газ;
- температурний інтервал неіонізованого газу, що є частиною газової фази складає 6000–1500 К;
- флюс-шлак випаровується під дією дугового розряду у передній (головній) частині реакційної зони зварювання, проходить через плазму дугового розряду, де відбувається його термічна дисоціація;
- при охолодженні газової фази, у низькотемпературній частині реакційної зони зварювання відбуваються процеси рекомбінації газоподібних сполук, які і формують склад газової фази.

Кожний оксид, що є складовою частиною флюсу має свої індивідуальні параметри термічної дисоціації. Ці параметри можуть бути визначені за допомогою хімічної термодинаміки згідно характеристичних термодинамічних функцій вихідних речовин та продуктів реакції. Основною задачею у цьому випадку є адекватна схема перетворення та дисоціації оксидів флюсу у реакційній зоні при зварюванні та наплавленні.

## Термодинамічні принципи покладені в основу розрахунку складу газової фази

Під дією плазми дугового розряду оксиди випаровуються, а процес їх термічної дисоціації та наступної рекомбінації визначається тільки можливістю утворення певних газоподібних сполук відповідно до температурних умов та індивідуальних властивостей речовин.

Для проведення теоретичного розрахунку складу газової фази за допомогою принципів рівноважної хімічної термодинаміки необхідно ввести певні допущення, які дозволять застосувати їх до складної багатоконпонентної термодинамічної системи в специфічних умовах зварювання.

До цих допущень відносяться:

- в результаті випаровування флюсу-шлаку, яке носить характер сублімації у газовій фазі, з'являються оксиди, які відповідають за своєю структурою первинному стану в якості якого прийнято вищий оксид;
- стехіометричні коефіцієнти хімічних рівнянь відображають мольний хімічний склад флюсу;
- до газової фази можна застосувати гіпотезу про квазіпостійність складу як наслідок наближення її складу до стану термодинамічної рівноваги у локальних областях;
- для розрахунку складу газової фази може застосовуватися принципи рівноважної термодинаміки газоподібних сполук за правилами термічної дисоціації;
- термічна дисоціація оксидів флюсу під впливом температури плазми дугового розряду відбувається за механізмом паралельно-послідовних реакцій для кожного оксиду;
- при складанні кожного паралельного рівняння дисоціації окремого компоненту флюсу стехіометричні коефіцієнти вихідних речовин (продуктів) реакції повинні співпадати з коефіцієнтами вхідних речовин наступної реакції.

## Розрахунок складу газової фази при зварюванні під флюсом

Під впливом енергії зварювальної дуги оксиди флюсу інтенсивно випаровуються. Це призводить до того, що у газовій фазі з'являються оксиди, які відповідають за своєю будовою первинному стану і знаходяться у вигляді перегрітого пару. Склад цього перегрітого пару, що відповідає певній температурі газової фази може бути розрахований виходячи із принципів рівноважної термодинаміки газоподібних сполук за правилами термічної дисоціації [19]. Враховуючи, що у повздовжньому напрямку розподіл температур у газовій фазі при зварюванні під флюсом має асиметричний характер у низькотемпературній зоні зварювання при зниженні тем-

ператури відбуваються процеси рекомбінації, які можуть розглядатися як зворотні процеси термічної дисоціації.

При певній температурі у газовій фазі знаходяться продукти термічної дисоціації (рекомбінації) компонентів флюсу, які визначаються ступенем термічної дисоціації кожного з'єднання. Для теоретичного розрахунку кількості речовин необхідна система алгебраїчних нелінійних рівнянь, яка пов'яже ступінь дисоціації з'єднань, що розглядаються та константу рівноваги певної реакції і враховує процес термічної дисоціації (рекомбінації) всіх газоподібних оксидів, які входять до складу флюсу. Шлакові системи флюсів за звий складають з оксидів кремнію ( $SiO_2$ ), титану ( $TiO_2$ ), кальцію ( $CaO$ ), магнію ( $MgO$ ), марганцю ( $MnO$ ), заліза ( $FeO$ ) та алюмінію ( $Al_2O_3$ ). У якості фторміських сполук використовують фторид кальцію ( $CaF_2$ ). Враховуючи прийняті допущення у газовій фазі, первинно, можуть знаходитись оксиди трьох типів:  $MeO_2$ ,  $MeO$ ,  $Me_2O_3$  вміст яких відповідає їх мольній концентрації у складі флюсу.

За схему термічної дисоціації газоподібних оксидів була прийнята схема запропонована у роботі [20] для вільних оксидів, але з урахуванням їх мольної концентрації.

Для трьохатомного оксиду металу  $MeO_2$ :

для оксиду типу  $MeO_2$

$$K'_{p} = \left( \frac{x_1^{1.5} \cdot (0.5 \cdot (1 - x_3))}{(1 - x_1)} \times \sqrt{\frac{0.5 \cdot (1 - x_2)}{0.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + x_1 x_3 + 1}} \right)^{n_{MeO_2}} \quad (9)$$

$$K''_{p} = \left( \sqrt{\frac{x_1}{0.5 \cdot (1 - x_2) \cdot (0.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + x_1 x_3 + 1)}} \times (x_2 + x_3) \right)^{n_{MeO_2}} \quad (10)$$

$$K'''_{p} = \left( \frac{x_1 \cdot x_3 \cdot (x_2 + x_3)}{(1 - x_3) \cdot (0.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + x_1 x_3 + 1)} \right)^{n_{MeO_2}} \quad (11)$$

для оксидів типу  $MeO$

$$K'_{p} = \left( \frac{x_1^{1.5}}{1 - x_1} \times \sqrt{\frac{0.5 \cdot (1 - x_2)}{0.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1}} \right)^{n_{MeO}} \quad (12)$$

$$K''_{p} = \left( x_2 \times \sqrt{\frac{x_1}{0.5 \cdot (1 - x_2) \cdot (0.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 1)}} \right)^{n_{MeO}} \quad (13)$$

для оксиду типу  $Me_2O_3$ :

$$K'_{p} = \left( 4 \times x_1^{2.5} \left( \frac{(1 - x_3)}{(1 - x_2)} \right)^2 \times \sqrt{\frac{0.5 \cdot (1 - x_2)}{3.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2x_1 x_3 + 1}} \right)^{n_{Me_2O_3}} \quad (14)$$

$$n_{MeO_2} MeO_2 = n_{MeO_2} MeO + 0,5n_{MeO_2} O_2 \quad (1)$$

$$0,5n_{MeO_2} O_2 = n_{MeO_2} O \quad (2)$$

$$n_{MeO_2} MeO = n_{MeO_2} Me + n_{MeO_2} O \quad (3)$$

Для двохатомного оксиду металу  $MeO$

$$n_{MeO} MeO = n_{MeO} Me + 0,5n_{MeO} O_2 \quad (4)$$

$$0,5n_{MeO} O_2 = n_{MeO} O \quad (5)$$

Для оксиду типу  $Me_2O_3$ :

$$n_{Me_2O_3} Me_2O_3 = 2n_{Me_2O_3} MeO + 0,5n_{Me_2O_3} O_2 \quad (6)$$

$$0,5n_{Me_2O_3} O_2 = n_{Me_2O_3} O \quad (7)$$

$$2n_{Me_2O_3} MeO = 2n_{Me_2O_3} Me + 2n_{Me_2O_3} O \quad (8)$$

де  $n_{MeO_2}$ ,  $n_{MeO}$ ,  $n_{Me_2O_3}$  – вміст оксидів у складі флюсу в молях.

Використовуючи методику яка пов'яже константу рівноваги, реакції, що розглядається та ступінь термічної дисоціації кожного компоненту газової суміші оксидів флюсу отримуємо відповідні системи рівнянь:





$$K''_p = \left( (x_2 + x_3) \times \sqrt{\frac{x_1}{0.5 \cdot (1 - x_2) \cdot (3.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2x_1 \cdot x_3 + 1)}} \right)^{n_{Me_2O_3}} \quad (15)$$

$$K'''_p = \left( \frac{x_1 \cdot x_3 (x_2 + x_3)}{(1 - x_3) \cdot (3.5 \cdot x_1 + 0.5 \cdot x_1 \cdot x_2 + 2x_1 \cdot x_3 + 1)} \right)^{2n_{Me_2O_3}} \quad (16)$$

де  $x_1, x_2, x_3$  – величини ступеню термічної дисоціації компонентів газової суміші відповідних реакцій; які являють собою частку дисоційованого газу.

Парціальний тиск (мольна частка) кожного компонента газової суміші становить:

$$\text{Для першої групи реакції} \quad N_{MeO_2} = \frac{n_{MeO_2}(1-x_1)}{\Sigma m_I}; \quad N_{MeO} = \frac{n_{MeO_2} x_1 (1-x_3)}{\Sigma m_I}; \quad N_{O_2} = \frac{0.5 n_{MeO_2} x_1 (1-x_2)}{\Sigma m_I};$$

$$N_O = \frac{n_{MeO_2} x_1 (x_2 + x_3)}{\Sigma m_I}; \quad N_{Me} = \frac{n_{MeO_2} x_1 x_3}{\Sigma m_I}.$$

Для другої групи реакції  $N_{MeO} = \frac{n_{MeO}(1-x_1)}{\Sigma m_{II}}; N_{O_2} = \frac{0.5 n_{MeO} x_1 (1-x_2)}{\Sigma m_{II}}; N_{Me} = \frac{n_{MeO} x_1 x_2}{\Sigma m_{II}}; N_O = \frac{n_{MeO} x_1 x_2}{\Sigma m_{II}},$   
де  $\Sigma m_{II}$  повна кількість молів у суміші, яка виникає при дисоціації оксиду  $MeO$   $\Sigma m_{II} = n_{MeO} (1 + 0.5x_1 + 0.5x_1x_2).$

Для третьої групи реакції  $N_{Me_2O_3} = \frac{n_{Me_2O_3}(1-x_1)}{\Sigma m_{III}}; N_{MeO} = \frac{2n_{Me_2O_3} x_1 (1-x_3)}{\Sigma m_{III}}; N_{O_2} = \frac{0.5 n_{Me_2O_3} x_1 (1-x_2)}{\Sigma m_{III}};$   
 $N_O = \frac{n_{Me_2O_3} x_1 (x_2 + 2x_3)}{\Sigma m_{III}}; N_{Me} = \frac{2n_{Me_2O_3} x_1 x_3}{\Sigma m_{III}},$  де  $\Sigma m_{III}$  повна кількість молів у суміші, яка виникає при дисоціації оксиду  $Me_2O_3$   $\Sigma m_{III} = n_{Me_2O_3} (1 + 3.5x_1 + 0.5x_1x_2 + 2x_1x_3).$

У разі необхідності подальших термодинамічних розрахунків значення кількості молей компоненту газової суміші (мольна концентрація, м. к.) розраховується за чисельником відповідного рівняння.

Отримані значення парціального тиску або мольної концентрації є вмістом компонентів у газовій фазі, яка виникає внаслідок рекомбінації газоподібних оксидів флюсу. Розгляд її як зворотного процесу термічної дисоціації дає можливість визначити склад газової фази при зварюванні під флюсом відповідно до температурних умов. Загальний вміст молекулярного та атомарного кисню, який виникає внаслідок термічної дисоціації різних оксидів, що є складовими флюсу, визначається шляхом підсумовування.

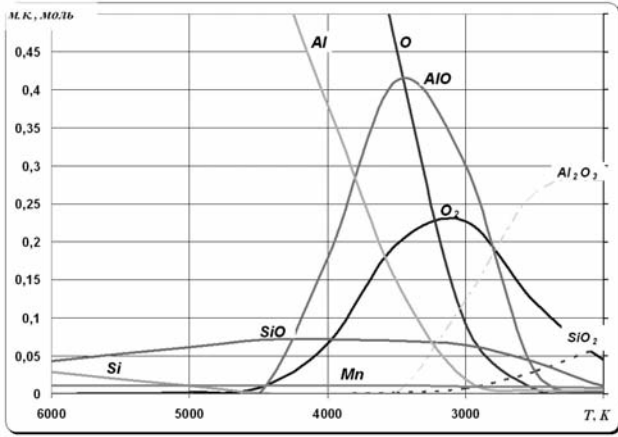
На основі розробленої методики нами були проведені розрахунки складу газової фази для різних марок флюсів (рис. 2).

Аналіз наведених результатів розрахунків показує, що зміна складу флюсу суттєво впливає на вміст компонентів газової фази, які генерує флюс. Суттєво змінюється вміст окислювача у газовій фазі. Так вміст атомарного кисню при 3500 К для флюсів АН-28, АН-348А, АН-45, АН-69 складає відповідно 0,455; 0,467; 0,375; 0,438 м. к. Змінюється також величина максимуму вмісту атомарного кисню та температура при якій він спостерігається (рис. 2). Ці данні можуть бути використані для оцінки окислювальної здатності шлакових розплавів при зварюванні, як це було запропоновано у роботі [21]. Ще одним важливим висновком, який впливає з наведе-

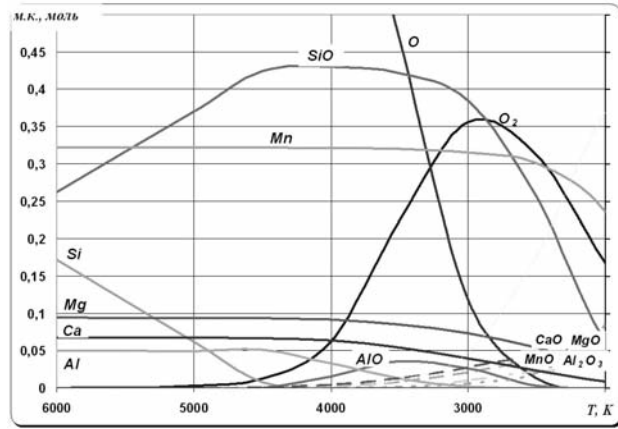
дених розрахунків є те, що найбільш стійким з'єднанням газової фази є монооксид кремнію ( $SiO$ ), вміст якого може досягати значних показників. Газоподібний кремній з'являється у газовій фазі після 4500 К. Загалом, наявність даних про мольний вміст компонентів у газовій фазі відповідно до температур, що розглядаються, дає змогу проводити розрахунки металургійних процесів на між фазній поверхні газ-метал та по новому оцінити розкислювальну здатність елементів в умовах зварювання.

## Висновки

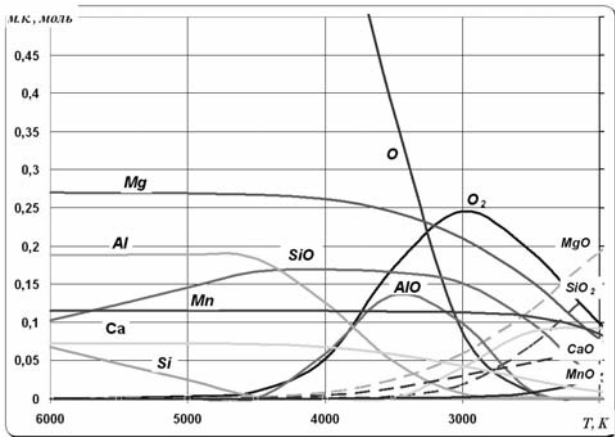
1. На основі аналізу фізичних процесів та температурних умов у реакційній зоні зварювання під флюсом показано, що катодними (анодними) плямами можуть бути зони, які займає флюс, а оксиди флюсу, які випаровуються, потрапляють у дуговий розряд та дисоціюють на компоненти і частково іонізуються. В результаті процеси термічної дисоціації є основою для формування початкового складу газової фази. Металургійна активна частина газової фази формується поза плазмою дугового розряду, де протікають процеси утворення хімічних сполук, рекомбінації та конденсації компонентів газової фази і основні хімічні реакції, які в подальшому формують хімічний склад металу шва та вміст у ньому газів. Термічна дисоціація цих газоподібних оксидів, що спочатку під впливом дугового розряду протікає у прямому напрямку, а потім, при охолодженні, у зворотному формує склад газо-



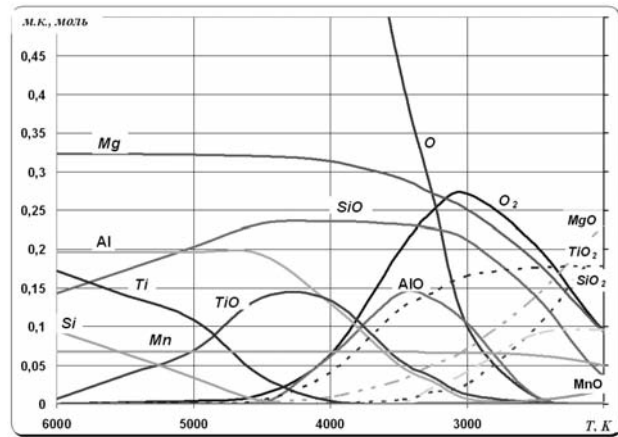
а



б



в



г

Рис. 2. Розрахунковий склад газової фази при зварюванні під флюсами АН-28 (а), АН-348А (б), АН-45 (в), АН-69 (г)

вої фази при електродуговому зварюванні під флюсом.

2. Запропонована методика розрахунку складу газової фази, яка основана на процесах термічної дисоціації газоподібних сполук у які перетворюються оксиди флюсу під дією плазми дугового розряду, і яка враховує їх початковий вміст у флюсі та дозволяє визначити парціальний тиск або мольну концентрацію елементів та з'єднань у газовій фазі.

3. Проведений розрахунок складу газової фази, яка виникає в умовах зварювання, для деяких промислових марок флюсів та її загальний аналіз на основі якого встановлено, що в залежності від складу флюсу вміст кисню у газовій фазі та інших її компонентів суттєво змінюється. Встановлено, що найбільш стійким з'єднанням газової фази є монооксид кремнію ( $SiO$ ), вміст якого може досягати значних показників.

4. Отримані розрахункові дані по складу газової фази можуть бути використані при подальшому аналізі та розрахунках металургійних процесів при зварюванні під флюсом.

### Література

- [1] Жданов Л.А. Современные представления о физико-химической модели электродуговой сварки под флюсом. Часть 1. Существующие схемы электродуговой сварки под флюсом. Технологические системы, 2007, № 4, с. 75–86. Часть 2. Экспериментальные исследования реакционной зоны при электродуговой сварке под флюсом. Технологические системы, 2008, № 1, с. 38–45.
- [2] А.А. Буки. Моделирование физико-химических процессов дуговой сварки // М.: Машиностроение. 1991 г., 287 с.
- [3] В.А. Судник и др. Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой каверне. Сварочное производство, 2012. № 7, с. 3–12.
- [4] Жданов Л.А. Використання еквівалентно-ефективної температури у розрахунках металургійних процесів при зварюванні під флюсом. Матеріали конференції «Зварювання та споріднені процеси і технології». Київ 2012. с. 20–21.
- [5] Дятлов В.И. Особенности металлургических процессов при сварке под флюсом. В кн.: Сборник трудов,



- посвященных 80-летию со дня рождения и 55-летию научной деятельности акад. Е.О. Патона. Киев. Изд-во АН УССР. 1951. С. 261–268.
- [6] Любавский К.В. Металлургия сварки стали плавлением. Справочник по сварке стали. Т 1. / под ред. Е.В. Соколова. — М.: ГНТИ Машиностроительной литературы, 1961. С. 57–140.
- [7] Походня И.К., Головки В.В., Кушнерев Д.М., Швачко В.И. Оценка окислительной способности керамических флюсов // Автомат. сварка. — 1990. — № 2. — с. 45–48.
- [8] Жданов Л.А., Сливинский А.М. Влияние углерода на металлургические процессы при электродуговой наплавке под флюсом // Сборник научных трудов Украинского государственного морского технического университета. — Николаев, 1999 — № 6(366).
- [9] Боженко Б.Л., Шалимов В.Н., Пучкин П.А., Купар Р.Ю. Кинетика окисления паров металла в дуге при сварке плавящимся электродом. Волгодонский институт Новочеркасского ГТУ, 1989. — с. 92–98.
- [10] Дмитренко Н.Н., Подгаецкий В.В. Некоторые особенности распределения компонентов сварочного флюса в плазме малоамперной дуги. Автоматическая сварка № 11, 1986, с. 37–40.
- [11] Мазель А.Г., Гоборев Л.А., Пумпурс В.М. Эмиссионные характеристики сварочных флюсов. Сварочное производство № 3, 1971, с. 7–9.
- [12] Жданов Л.А., Коваленко В.Л., Зворыкин К.О. Расшифровка компьютерных осциллограмм при электродуговой сварке на переменном токе. Технологические системы, 2005, № 5–6, с. 63–66.
- [13] Жданов Л.А., Коваленко В.Л. Особенности изучения дугового сварочного разряда. Материали п'ятої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників «Зварювання та споріднені технології і процеси»./ Київ: 18–20 квітня 2012 р., с. 22–27.
- [14] Кирдо И.В. Измерение температуры мощной сварочной дуги, горящей под флюсом. В кн.: Сборник трудов, посвященных 80-летию со дня рождения и 55-летию научной деятельности акад. Патона Е.О. Киев. Изд-во АН УССР. 1951, 95 с.
- [15] Кирдо И.В. О составе газов, окружающих дугу при сварке под флюсом. // Автоматическая сварка, № 1, 1950, С. 25–29.
- [16] Кесаев И.Г. Катодные процессы электрической дуги. Изд-во «Наука». 1968 — 244с.
- [17] Березовский Б.М. Математические модели дуговой сварки: В 3 т. — Том. 2. Математическое моделирование и оптимизация формирования различных типов сварных швов. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — 601 с.
- [18] Жданов Л.А. Современные представления о физико-химической модели электродуговой сварки под флюсом. Часть 3. Интегрированная физико-химическая модель реакционной зоны при электродуговой сварке под флюсом. Технологические системы, 2008, № 3. с. 25–38.
- [19] Жданов Л.А. Особливості термічної дисоціації оксидів при зварюванні та наплавленні під флюсом. Технологические системы, 2008, № 2, с. 71–83.
- [20] L. Zhdanov, V. Kovalenko, N. Strelenko, Y. Chvertko Peculiarities of Thermal Dissociation of Oxides during Submerged Arc Welding. Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol. 18, No. 04, p. 314–321, Out/Dez 2013.
- [21] Жданов Л.А. Теоретичне визначення вмісту кисню у металі шва при электродуговому зварюванні під флюсом Технологические системы, 20012, № 3. с. 56–64.

Zhdanov L.A.

National Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”. Ukraine, Kyiv

#### THERMODYNAMIC METHOD OF CALCULATION OF COMPOSITION OF GAS PHASE IN SUBMERGED ARC WELDING

*Based on the analysis of physical processes and temperature conditions in the reaction zone of submerged arc welding is shown that under the influence of plasma of arc discharge flux oxides are evaporate and thermally dissociate. The initial gas phase composition corresponds to the flux composition. Outside the plasma of arc discharge is formed metallurgically active part of the gas phase, in which the processes of formation of compounds, recombination and condensation of components flow at the decline of temperature. Proposed thermodynamic method of calculation of gas phase composition is based on the processes of thermal dissociation of gaseous compounds, which allows to determine the partial pressure or molar concentration of elements and compounds. Has been realized the calculation of the gas phase composition for some industrial brands fluxes and their general*

*analysis. The obtained data of gas phase composition can be used for further analysis and calculations of metallurgical processes in submerged arc welding.*

*Keywords:* submerged arc welding; reaction zone; gas phase; thermal dissociation.

### References

- [1] Zhdanov L.A. Sovremennyye predstavleniya o fiziko-khimicheskoy modeli elektrodugovoy svarki pod flyusom. Chast 1. Sushchestvuyushchiye skhemy elektrodugovoy svarki pod flyusom. Tekhnologicheskiye sistemy, 2007, № 4, p. 75–86. Chast 2. Eksperimentalnyye issledovaniya reaktsionnoy zony pri elektrodugovoy svarke pod flyusom. Tekhnologicheskiye sistemy, 2008, № 1, p. 38–45. (In Russian).
- [2] A.A. Buki. Modelirovaniye fiziko-khimicheskikh protsessov dugovoy svarki // M.: Mashinostroyeniye. 1991 g., 287 p. (In Russian).
- [3] V.A. Sudnik i dr. Matematicheskaya model protsessa svarki pod flyusom i yavleniy v dugovoy kaverne. Svarochnoye proizvodstvo, 2012. № 7, p. 3–12. (In Russian).
- [4] Zhdanov L.A. Viktoristannya yekvivalentno-efektivnoi temperaturi u rozrakhunkakh metalurgiy-nikh protsesiv pri zvaryuvanni pid flyusom. Materiali konferentsii “Zvaryuvannya ta sporidneni protsesi i tekhnologii”. Kiiv 2012. P. 20–21. (In Ukrainian).
- [5] Dyatlov V.I. Osobennosti metallurgicheskikh protsessov pri svarke pod flyusom. V kn.: Sbornik trudov, posvyashchennykh 80-letiyu so dnya rozhdeniya i 55-letiyu nauchnoy deyatelnosti akad. Ye.O. Patona. Kiyev. Izd-vo AN USSR. 1951. P. 261–268. (In Russian).
- [6] Lyubavskiy K.V. Metallurgiya svarki stali plavleniyem. Spravochnik po svarke stali. T 1. / pod red. Ye.V. Sokolova. – M.: GNTI Mashinostroitelnoy literatury, 1961. P. 57–140. (In Russian).
- [7] Pokhodnya I.K., Golovko V.V., Kushnerev D.M., Shvachko V.I. Otsenka okislitelnoy sposobnosti keramicheskikh flyusov // Avtomat. svarka. – 1990. – № 2. – P. 45–48. (In Russian).
- [8] Zhdanov L.A., Slivinskiy A.M. Vliyaniye ugleroda na metallurgicheskiye protsessy pri elektrodugovoy naplavke pod flyusom // Sbornik nauchnykh trudov Ukrainskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta. – Nikolayev, 1999 – № 6(366). (In Russian).
- [9] Bozhenko B.L., Shalimov V.N., Puchkin P.A., Kupar R.Yu. Kinetika okisleniya parov metalla v duge pri svarke plavyashchimsya elektrodom. Volgodonskiy institut Novocherkasskogo GTU, 1989. – P. 92–98. (In Russian).
- [10] Dmitrenko N.N., Podgayetskiy V.V. Nekotoroye osobennosti raspredeleniya komponentov svarochnogo flyusa v plazme maloampurnoy dugi. Avtomaticheskaya svarka №11, 1986, p. 37–40. (In Russian).
- [11] Mazel A.G., Goborev L.A., Pumpurs V.M. Emissionnyye kharakteristiki svarochnykh flyusov. Svarochnoye proizvodstvo № 3, 1971, p. 7–9. (In Russian).
- [12] Zhdanov L.A., Kovalenko V.L., Zvorykin K.O. Rasshifrovka kompyuternykh ostillogramm pri elektrodugovoy svarke na peremennom toke. Tekhnologicheskiye sistemy, 2005, № 5–6, p. 63–66. (In Russian).
- [13] Zhdanov L.A., Kovalenko V.L. Osobennosti izucheniya dugovogo svarochnogo razryada. Materiali p'yatoi vseukraïnskoi mizhgaluzevoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta naukovikh spivrobitnikiv “Zvaryuvannya ta sporidneni tekhnologii i protsesi”. / Kiiv: 18–20 kvitnya 2012 r., p. 22–27. (In Russian).
- [14] Kirido I.V. Izmereniye temperatury moshnoy svarochnoy dugi, goryashchey pod flyusom. V kn.: Sbornik trudov, posvyashchennykh 80-letiyu so dnya rozhdeniya i 55-letiyu nauchnoy deyatelnosti akad. Patona Ye.O. Kiyev. Izd-vo AN USSR. 1951, 95 p. (In Russian).
- [15] Kirido I.V. O sostave gazov, okruzhayushchikh dugu pri svarke pod flyusom. // Avtomaticheskaya svarka, № 1, 1950, P. 25–29. (In Russian).
- [16] Kesayev I.G. Katodnyye protsessy elektricheskoy dugi. Izd-vo “Nauka”. 1968 – 244 p. (In Russian).
- [17] Berezovskiy B.M. Matematicheskiye modeli dugovoy svarki: V 3 t. – Tom. 2. Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya formirovaniya razlichnykh tipov svarnykh shvov. – Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2003. – 601 p. (In Russian).
- [18] Zhdanov L.A. Sovremennyye predstavleniya o fiziko-khimicheskoy modeli elektrodugovoy svarki pod flyusom. Chast 3. Integrirovannaya fiziko-khimicheskaya model reaktsionnoy zony pri elektrodugovoy svarke pod flyusom. Tekhnologicheskiye sistemy, 2008, № 3. P. 25–38. (In Russian).
- [19] Zhdanov L.A. Osoblivosti termichnoi disotsiatsii oksidiv pri zvaryuvanni ta naplavlenni pid flyusom. Tekhnologicheskiye sistemy, 2008, № 2. P. 71–83. (In Russian).
- [20] L. Zhdanov, V. Kovalenko, N. Strelenko, Y. Chvertko Peculiarities of Thermal Dissociation of Oxides during Submerged Arc Welding. Soldagem & Inspeção. São Paulo, Vol. 18, No. 04, p. 314–321, Out/Dez 2013.
- [21] Zhdanov L.A. Teoretichne viznachennya vmistu kisnyu u metali shva pri yelektrodugovomu zvaryuvanni pid flyusom Tekhnologicheskiye sistemy, 20012, № 3. P. 56–64. (In Russian).