



УДК 621.791.75.01

Жданов Л.А.

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

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ВМІСТУ КИСНЮ У МЕТАЛІ ШВА ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАННІ ПІД ФЛЮСОМ

Анотація

Для теоретичного прогнозування вмісту кисню в металі шва при електродуговому зварюванні запропонована розрахункова фізико-термодинамічна модель, згідно з якою джерелом кисню в металі шва є газова фаза що виникає в результаті термічної дисоціації оксидів флюсу.

Абсорбція кисню в киплячому металі відбувається через поверхневий газовий шар Кнудсена. Критерієм розрахунку є еквівалентна ефективна температура.

Проведена перевірка адекватності запропонованої моделі. Встановлено значення еквівалентної ефективної температури для промислових флюсів, межі зміни мольної концентрації атомарного кисню в газовій фазі відповідні процентному вмісту кисню в металі шва.

Abstract

For the theoretical prediction of the oxygen content in weld metal during arc welding proposed settlement of physical and thermodynamic model in which the oxygen in the weld metal is the gas phase resulting from the thermal dissociation of oxides of flux.

Absorption of oxygen in the fluid metal surface occurs through the Knudsen layer of gas. The criterion is equivalent to the calculation of the effective temperature.

Checked the adequacy of the proposed model. Set to the equivalent effective temperature for industrial fluxes, the range of variation of the molar concentration of atomic oxygen in the gas phase relevant to the percentage of oxygen in the weld metal.

Вступ

Поява нових марок високоміцних низько та середьологованих сталей і зростання вимог до якісних та механічних характеристик зварного шва вимагає сучасних підходів до аналізу металургійних процесів при зварюванні під флюсом. Одним з таких елементів, що мають суттєвий вплив на механічні властивості є кисень. У той же час методи прогнозування кисню у металі шва були розроблені у 60-х роках минулого століття на основі аналізу реакцій на границі-шлак метал та не відображають сучасних уявлень про структуру реакційної зони зварювання. Це призвело до того, що вибір флюсу для зварювання стає досить проблематичною задачею. Пов'язано це з ігноруванням наявності газової фази при електродуговому зварюванні під флюсом.

Постановка задачі

Концентрація кисню у металі шва є фактором який у великій мірі визначає механічні властивості зварного з'єднання. Вважається, що його вміст у металі шва при зварюванні під флюсом низько- та середньо легованих сталей може змінюватися від 0,02 до 0,2 % та у великій мірі залежить від складу флюсу. Оцінку впливу флюсу на можливий вміст кисню у металі шва намагаються проводити за допомогою формул для розрахунку «основності» флюсу [1–5], або інших рівнянь які враховують металургійні властивості шлаків [6–9]. З точки зору металургійного впливу всі ці формули побудовані на основі реакцій на границі шлак–метал та не враховують наявності газової фази при зварюванні під флюсом. Існуючи у літературі дані по можливості прогнозування вмісту

кисню у металі шва на основі формул «основності» показують, що вони можуть використовуватися лише як якісний показник для характеристики флюсу як основного, нейтрального або кислого типу. Для нейтральних флюсів вони не відображають реальної картини металургійної взаємодії, що загалом признають і самі дослідники, які пропонують певні рівняння для визначення індексу основності флюсу [6, 10]. Розрахунки індексу основності для основних флюсів дають різні, часто суперечливі значення. Тому для прогнозування залежності вмісту кисню у металі шва від складу зварювальних матеріалів пропонуються використовувати емпіричні рівняння побудовані на основі експериментальних даних для певних систем флюс—дріт. Зрозуміло, що для всебічної характеристики зварювальних флюсів такий підкод неприйнятний.

Дана проблема може бути вирішена, якщо при розгляді металургійних процесів при електродуговому зварюванні, враховувати наявність у реакційній зоні зварювання газової фази [11–13]. Кисень газової фази є продуктом термічної дисоціації оксидів [14]. При цьому враховуючи, що кисень знаходиться в металі у атомарному вигляді, або у вигляді оксидів, газоподібний кисень реакційної зони зварювання повинен напряму впливати на залишковий кисень у металі шва. Металургійні реакції за участю металів, що розчиняються у залізі, можуть змінювати форму існування кисню у металі шва, але не мають вирішального значення для його остаточного вмісту. Суттєвий вплив на вміст кисню у металі шва має вуглець який має підвищену термодинамічну активність до вуглецю у області високих температур, що призводить до зниження його концентрації у розплавленому металі за рахунок утворення оксиду вуглецю [15, 16].

Метою даної роботи було розробка теоретичної моделі визначення вмісту кисню у газовій фазі при використанні флюсів різного складу та перевірка її адекватності.

Фізичні принципи покладені в основу моделі визначення кисню у шві

Перенос речовини у загальному випадку може здійснюватися послідовними та паралельними стадіями. Кожна стадія характеризується певними просторовим масштабом, який є симетричною величиною області її протікання, та механізмом проходження: кінетичним, дифузійним або конвекційним.

Основним джерелом надходження кисню у реакційну зону при зварюванні під флюсом є шлак. Кисень з'являється у газовій фазі в результаті процесів термічної дисоціації оксидів флюсу. Термічна дисоціація оксидів флюсу під впливом температури плазми дугового розряду відбувається за механізмом паралельних реакцій для кожного оксиду, за умови їх послі-

довного протікання. Тобто вихідними даними для кожної наступної реакції дисоціації є продукти попередньої, причому реакції протікають одночасно. Для теоретичного розрахунку вмісту кисню у газовій фазі необхідна система рівнянь, яка враховує процес термічної дисоціації всіх оксидів, які входять до складу флюсу та їх одночасну дисоціацію. Пов'язано це з тим, що під дією плазми дугового розряду оксиди випаровуються, а процес їх термічної дисоціації визначається тільки можливістю утворення певних газоподібних сполук відповідно до температурних умов. Враховуючи, що у повздовжньому напрямку розподіл температур у газовій фазі при зварюванні під флюсом має асиметричний характер, при зниженні температури відбуваються процеси рекомбінації, які можуть розглядатися як зворотні процесам дисоціації.

Проведений нами аналіз експериментальних, літературних даних і теоретичних розрахунків показав, що при електродуговому зварюванні та наплавленні розподілення температурного поля у реакційній зоні змінюється по температурному градієнту і відрізняється у різних зонах у декілька раз, приблизно від 1700 до 6000 К. Пояснюється це тим, що температура плавлення сталі 1723–1793 К, а температура прикордонних ділянок дугового розряду при зварюванні під флюсом може бути прийнята у 6000 К [14]. Температура газової фази визначається температурою плазми дугового розряду, причому з точки зору проходження хімічних реакцій ця температура обмежується температурою пограничної ділянки чи перехідної зони плазми дугового розряду приблизно і складає 5000–6000 К, а з іншого боку — температурами кипіння металу (2500–2800 К) та шлаку (≈ 3000 К).

Однією з основних причин обмежень, що накладаються на застосування рівноважної термодинаміки до металургійних процесів при зварюванні, є лімітуючі кінетичні умови протікання процесів.

Проведені розрахунки числа Рейнольдаса та Шмідта для тонких пограничних шарів металу та шлаку які примикають до газової фази реакційної зони зварювання, показали, що він є дуже тонким та швидкість рідини і обриси підшару стають незалежними від наведених критеріїв [18,19]. Враховуючи градієнт температур на цих міжфазних поверхнях можливо допустити, що у даному випадку відбувається плівкове кипіння, тобто існують киплячі перегріті прошарки металу та шлаку.

Більш узагальненим критерієм, що характеризує механізми протікання фізичних та хімічних процесів є критерій Дамкелера (Damköhler Da), який є критерієм подоби у хімії та визначається як відношення часу (швидкості) різноманітних фізичних процесів (t_n) до часу (t_x) (швидкості) хімічної реакції ($Da = t_n/t_x$). Вважається, якщо він більше одиниці то перевагу над кінетичними процесами мають дифузійні [20]. На



можливість використання критерію Дамкелера при аналізі процесу поглинання газів під впливом плазми дугового розряду вказують інші дослідники [21].

При зварюванні під флюсом на міжфазних поверхнях, що контактують з газом $Da \gg 1$. Про це свідчить те, що в умовах зварювання під флюсом характерний час самого фізичного процесу (час існування реакційної зони зварювання) набагато більший характерного часу протікання реакції у локальних температурних областях за участю газової фази. Крім того, температури на міжфазних поверхнях, що контактують з газовою фазою змінюються від 4500 до 1500 К, тобто на 3000 К на дуже малій товщині, менше міліметра. При таких температурах реакції протікають зі швидкостями, які значно перевищують швидкість процесів теплообміну та масопереносу. Швидкість реакції першого порядку лінійно залежить від концентрації реагентів та константи термодинамічної рівноваги цієї реакції. Постійна швидкості реакції (k) є прямою функцією константи рівноваги реакції, яка для більшості реакцій, що відбуваються у газовій фазі та її міжфазних поверхнях, визначається величиною 10^5 – 10^6 . В результаті перше число Дамкелера, яке розраховується за формулою (1) [20], також набагато більше одиниці.

$$Da_1 = k \times C_0^{n-1} \times t, \quad (1)$$

де k – постійна швидкості реакції; C_0 – початкова концентрація; n – порядок реакції; t – час.

Тому числа Дамкелера для реакцій на міжфазних поверхнях газової фази завжди будуть набагато більше одиниці, а масообмін визначається дифузійним механізмом.

Враховуючи великі значення коефіцієнту Дамкелера та градієнт температур, який на міжфазних поверхнях газ–метал та газ–шлак може досягати 10 000 К/мм поверхневі шари цих міжфазних поверхонь можна вважати продовженням газової фази, або окремою фазою. Саме цей киплячий прошарок є постачальником кисню у розплав металу при електродуговому зварюванні джерелом якого виступає газова фаза. На цій поверхні відбувається абсорбція атомів кисню з подальшою дифузиею їх у розплав металу. З цим прошарком контактує шар газу з особливими властивостями де закони класичної газової динаміки не діють. Для аналізу процесів у цій зоні необхідно застосовувати принципи динаміки розріджених газів, тобто враховувати можливість зіткнення часток газу у приповерхневому шару, яка враховується за допомогою функції розподілу молекул (кінетична теорія).

На наявність існування тонкого прошарку газу з іншими фізичними властивостями, який утворюється на границі газ–метал вказують інші дослідники [22, 23]. Цей прошарок виникає в результаті зіткнення атомів та молекул газу з поверхнею, коли довжина вільного пробігу атомів та молекул між зіткнен-

ням (λ) наближується до розміру слою (L). В результаті число Кнудсена ($Kn = \lambda/L$) наближується до одиниці і для пояснення процесів, що відбуваються потрібно залучення положень кінетичної теорії газів. Існує математична модель абсорбції газів металом зварювальної ванни та її аналітичне вирішення на основі системи рівнянь, у якій враховується газодинамічний рух часток у плазмі з застосуванням положень газової динаміки, їх молекулярної взаємодії у приповерхневому шару Кнудсена на основі кінетичної теорії газів і перерозподілу домішок у металі. В результаті на основі розрахунків розчинення водню у розплавленому залізі показано, що на результат абсорбції та розчинення водню великий вплив має не тільки температура газу, що пояснюється зміною ступені його дисоціації, а і процеси випаровування металу під дією високих температур. Причому існує максимум, який для умови розчинення водню у залізі під впливом аргонової плазми знаходиться у інтервалі температур 2700–2800 К. Після цього кількість розчиненого водню різко знижується. Розрахункові дані добре співпадають з експериментальними [23].

Для азоту показано, що на процес його розчинення має вплив рекомбінація атомів газу в результаті їх взаємодії високо нагрітого газу з поверхнею з поверхнею металу, а на процес адсорбції – внутрішня колівальна енергія молекул. Отримана розрахункова залежність корелюється з експериментальними даними. [24, 25].

Основна відмінність розчиненню кисню, або інших газів при зварюванні під флюсом від наведеної схеми полягає у тому, що метал міжфазної поверхні, який контактує з газом має температуру нижче ніж газова фаза в результаті чого на міжфазній поверхні газ–метал відбувається рекомбінація з утворенням молекулярних з'єднань. В результаті на поверхні металу адсорбуються не тільки атоми газів, а і молекули, які виникають в результаті рекомбінації та відбувається хемосорбція. Цей фактор сумісно з випаровуванням металу знижує можливість розчинення газів у металі і накладає кінетичні обмеження на характер дифузійних процесів.

Мольна концентрація компонентів газової фази у області що взаємодіє з металом визначається температурою. Шар Кнудсена, який утворюється над поверхнею киплячого металу складається з компонентів газової фази, результатів випаровування металу та рекомбінації атомів і молекул в результаті взаємодії поверхні розплавленого металу з газовою фазою. Ці фактори вносять суттєві корективи у процес взаємодії розплавленого металу з газовою фазою та призводить до утворення прошарку газу, що відрізняється по складу від рівноважного розрахункового складу газової фази. Цей шар є постачальником елементів та з'єднань, що абсорбуються поверхневим шаром розплавленого металу і в подальшому розчи-

няються у розплавленому металі. Виходячи з того, що його формування також напряму пов'язано з температурними умовами можна допустити, що саме температуру можна прийняти за фактор оцінки процесу абсорбції газів поверхнею металу з яким напряму пов'язана їх дифузія і кінцевий вміст у металі шва. При цьому у якості мінімальної температури доречно розглядати температуру кипіння металу, а максимальної — температуру газової фази, яка наближується до температури пограничних ділянок плазми дугового розряду. Тому в якості інтервалу температур було прийнято 2500–6000 К, а сама температура прошарку газу яка відповідає реальному вмісту кисню у металі шва була названа еквівалентно-ефективною температурою.

Використання еквівалентно-ефективної температури у розрахунках металургійних процесів при зварюванні під флюсом

Еквівалентно-ефективна температура (ЕЕТ) це показник який широко використовуються при розрахунках теплового впливу газового середовища на різні об'єкти. При цьому приймається, що вона є функцією багатьох параметрів, які в кінцевому випадку визначають стан та фізико-хімічні властивості об'єкту дослідження в умовах рівноваги.

При електродуговому зварюванні під флюсом на границі газ—метал до параметрів, що визначають ЕЕТ відносяться: локальна температура газової фази в області, яка контактує з розплавленим металом; концентраційні умови у газовій фазі при певній температурі та у розплавленому, киплячому металі; коефіцієнти дифузії, розчинення та абсорбції елементів у металі ванни, процеси їх випаровування; гідродинамічні умови у зварювальній ванні. В результаті взаємодії цих параметрів виникає певна концентрація елементів та газів у металі шва, що в кінцевому випадку відповідає їх кінцевому вмісту у шві.

В результаті при прогнозуванні впливу газової фази, яка визначається хімічним складом флюсу, на вміст кисню у металі шва необхідно враховувати фізичні особливості взаємодії газу з поверхнею металу зварювальної ванни та вплив флюсу на формування поверхні зварювальної ванни і краплі та фізико-хімічні властивості металу, який контактує з газом, а також гідродинамічні умови у зварювальній ванні. Тому в якості узагальнюючого параметру може бути прийнята величина ЕЕТ. Ця величина температури повинна відповідати певній температурі газової фази, при якій існує рівноважна концентрація співвідношення її компонентів, що визначається складом флюсу. Причому ця величина перевищує температуру кипіння металу, тому що вона характеризує енергетичні умови взаємодії газу з металом, які виникають у тонкому прошарку газу біля поверхні розплавленого металу. Найбільш показовим фактором при

зварюванні під флюсом для цієї величини є данні про розчинення кисню у металі шва. Пов'язано це з тим, що вміст кисню у газовій фазі визначається тільки процесами термічної дисоціації оксидів флюсу, а постачальником кисню у метал шва може бути тільки флюс.

В результаті фізичні принципи моделювання визначення кисню у шві на основі концентрації кисню у газовій фазі можуть бути сформульовані наступним чином:

- джерелом кисню металу шва є кисень газової фази;
- кисень газової фази є наслідком термічної дисоціації оксидів флюсу, яка протікає за послідовно-паралельним механізмом і його мольна концентрація визначається механізмом дисоціації та температурою;
- реакційні температури внутрішньої складової шлакового куполу складають 2500–6000 К;
- атомарний кисень газової фази потрапляє у розплавлений метал через киплячий прошарок, який контактує з шаром Кнудсена, за дифузійним механізмом абсорбуючись на його поверхні киплячого металу;
- кінцевий вміст кисню у металі шва визначається мольною концентрацією кисню у газовій фазі при певній ефективній еквівалентній температурі.

Розробка теоретичної моделі визначення вмісту кисню у газовій фазі при зварюванні під флюсом та проведення розрахунків

Для визначення вмісту кисню у газовій фазі необхідно розробити модель яка враховує процес його надходження у реакційну зону. При електродуговому зварюванні під флюсом основним джерелом кисню у газовій фазі є процес термічної дисоціації оксидів флюсу.

Раніш було показано, що при електродуговому зварюванні під флюсом схема розрахунку вмісту кисню у газовій фазі реакційної зони зварювання, коли парціальний тиск кисню у системі оксид—метал—кисень визначається виходячи з наявності оксиду та металу у конденсованому стані, а інших — на основі процесів випаровування, є неприйнятною [14]. Для вирішення даної задачі запропоновано розглядати процеси термічної дисоціації газоподібних оксидів під дією температур характерних для внутрішньої складової газової фази. Визначені принципи та методологія теоретичного розрахунку окислювальної здатності газової фази при електродуговому зварюванні та наплавленні [13].

Використовуючи схему розрахунку складу газової фази при дисоціації чистих оксидів [14, 13] та методологію розрахунку газової фази при зварюванні під флюсом нами було розроблено модель теоретичного визначення вмісту кисню у газовій фазі відповідно до складу флюсу.



Дана модель складається з наступних етапів:

– визначення мольного складу флюсу відповідного до його процентного складу;

– розрахунок ступеню термічної дисоціації кожного оксиду, та продуктів його дисоціації який є складовою флюсу відповідно до його мольної частки у флюсі;

– розрахунок концентрації атомарного кисню у газовій фазі, для оксидів, що входять до складу флюсу для температурних умов характерних для реакційної зони зварювання, тобто 2500–6000 К;

– визначення сумарної концентрації атомарного кисню у газовій фазі, що є результатом дисоціації оксидів флюсу;

– визначення еквівалентної ефективної температури взаємодії на границі газ–метал, яка відповідає насиченню розплавленого металу киснем газової фази;

– визначення мольної концентрації кисню у газовій фазі, яка характеризує вміст кисню у металі шва.

Перерахунок процентного складу флюсу у мольну проводиться за стандартною процедурою. Розрахунок ступеню дисоціації оксидів та продуктів їх дисоціації та перерахунок його у мольну концентрацію за методикою дисоціації газоподібних сполук [14], яка полягає у складанні системи математичних алгебраїчних рівнянь для кожного оксиду та знаходження дійсних коренів цієї системи, які відповідають ступеню дисоціації. При цьому для кожного складу флюсу у якості початкових стехіометричних коефіцієнтів для певного оксиду виступає його мольна концентрація (м.к.) у флюсі. Відповідно змінюються і кінцева система рівнянь. Складання та вирішення такої системи є найбільш трудомісткою задачею даної схеми розрахунку, яка може бути спрощена за допомогою програмних математичних пакетів. Ступень дисоціації з'єднання визначається для температур газової фази з певним шагом. Необхідність визначення мольної концентрації, а не парціального тиску пов'язано з тим, що останній характеризує процентне співвідношення компонентів у газовій фазі, а не кількість речовини, яка вступає у хімічну реакцію. На основі значень мольної концентрації атомарного кисню, що утворюється при дисоціації кожного оксиду, формується загальна матриця м. к. для кожної температури і після підсумовування її значень визначається загальна концентрація кисню, яка утворюється у газовій фазі в результаті термічної дисоціації всіх оксидів флюсу для заданої температури.

Перевірка адекватності запропонованої теоретичної моделі визначення вмісту кисню у металі шва при зварюванні під флюсом

Нами були проведені розрахунки вмісту атомарного кисню у газовій фазі для флюсів промислових марок різних шлакових систем, при зварюванні під

якими метал шва має різний вміст кисню (рис. 1, а). Для розрахунку використані данні довідника [6] у якому проведено класифікацію флюсів згідно показника «відносної хімічної активності A_{ϕ} », та для деяких флюсів наведено вміст кисню у шві. Усереднені состави флюсів, що використовувались у розрахунках наведені у таблиці 1.

В результаті розрахунку вмісту атомарного кисню у газовій фазі, що є наслідком термічної дисоціації оксидів встановлено, що характер залежностей атомарного кисню від температури однаковий для різних флюсів, але для в залежності від шлакової системи та співвідношенні компонентів величина кисню, що знаходиться у газовій фазі при певних температурах змінюється за складною схемою. Так при температурі 2500 К максимальний вміст кисню забезпечує флюс ФЦ-6 (0,0135 м.к.), ФЦ-3 (0,0130 м.к.), АН-348 (0,0126 м.к.), а мінімальний – АН-47 (0,009 м.к.), АН-15, АНК-57, НФ-15М (0,008 м.к.), АНК-44 (0,007 м.к.). При збільшенні температури порядок розташування флюсів змінюється. Так при температурах 5000 К послідовність зниження мольної концентрації кисню у газовій фазі для флюсів має наступний порядок АНК-44 (1,378 м.к.), АН-47 (1,272 м.к.), ФЦ-3 (1,06 м.к.), АН-348 (1,037 м.к.), НФ-15М, ФЦ-6 (1,026 м.к.), АН-15 (1,01 м.к.), АНК-57 (0,93 м.к.). Зміна у послідовності мольних концентрацій кисню у газовій фазі для різних флюсів відбувається у різних інтервалах температур (рис. 1, а). Це свідчить про те, що для визначення взаємозв'язку між вмістом кисню у газовій фазі та металі шва необхідно визначити температуру яка відповідає умовам, які виникають у прошарку, що контактує з киплячим металом і відповідає процесу розчинення кисню – еквівалентну ефективну температуру.

Порівняльний аналіз результатів розрахунку вмісту атомарного кисню у газовій фазі при різних температурах (рис. 1, а) з концентрацією кисню у металі шва (табл. 1) показує, що найбільш прийнятна залежність спостерігається при температурі газової фази у 3250 К (рис. 2, а). Саме ця температура може бути прийнята як значення ЕЕТ, для даних марок флюсів. Мольна концентрація кисню у газовій фазі при цій ЕЕТ змінюється від 0,24 до 0,3 молей. Слід відміти, що промислові флюси мають стабільно гарні зварювально-технологічні властивості, що свідчить про оптимальні фізичні властивості шлаку по відношенню до розплавленого металу зварювальної ванни.

Виходячи з того, що фізичні властивості шлаку повинні впливати на кінетичні фактори, які визначають хімічні процеси на міжфазних поверхнях можна припустити, що значення ЕЕТ для флюсів з різними фізичними властивостями, також буде змінюватися. Для підтвердження цього припущення нами були проведені розрахунки мольної концентрації атомарного кисню у газовій фазі для дослідних плавлених

флюсів виготовлених на базі шлакової системи флюсу АН-69, яка складається з оксидів кремнію, титану, алюмінію, магнію, кальцію, марганцю та заліза у різному співвідношенні (табл. 2). Основною відмінністю цих флюсів, є відсутність у їх складі з'єднань фтору та підвищений вміст у них оксидів титану та магнію.

Для визначенню кисню у металі шва проводилось багатопарове наплавлення за стандартною методикою дротами Св.-08 А та 30ХГСА діаметром 2 мм на зворотній полярності $I_{зв} = 180-200$ А, $U_{зв} = 26-28$ В, $V_{зв} = 20$ м/год. Кисень у металі шва визначався методом вакуумної плавки. Гарні зварювально-технологічні властивості мають флюси ОФ-5, ОФ-6 та ОФ-7. У інших флюсів ці властивості гірші, а деякі показали незадовільну формуючу здатність (ОФ-3 та ОФ-2).

Загальний вигляд залежності вмісту атомарного кисню у газовій фазі від температури (рис. 1, б) показує, що характер залежностей також однаковий для різних флюсів однієї шлакової системи. Основна відмінність полягає у різній концентрації кисню у га-

зовій фазі для флюсів з різним співвідношенням компонентів. На перший погляд це проявляється при температурах вище 5500 К, але більш детальний аналіз отриманих залежностей показує, що при більш низьких температурах спостерігається аналогічна тенденція яка була отримана для флюсів різних шлакових систем. Так при температурі 2500 К вміст кисню у газовій фазі змінюється у наступних міжах: 0,0078–0,0099 моль. Послідовність розташування флюсів наступна: ОФ-5 (0,0099), ОФ-6 (0,0097), ОФ-7 (0,0092), ОФ-3 (0,0092), ОФ-1 (0,0089), ОФ-2 (0,0081), ОФ-4 (0,0079) моль. При 5000 К – ОФ-4 (1,31), ОФ-2 (1,31), ОФ-1 (1,27), ОФ-3 (1,24), ОФ-5 (1,23), ОФ-7 (1,23), ОФ-6 (1,21) моль, тобто зовсім інша.

Порівняння результатів розрахунків м.к. розрахункового кисню з вмістом кисню у металі шва дозволили встановити, що ЕЕТ для флюсів ОФ-5, ОФ-6, ОФ-7 ЕЕТ дорівнює 3250 К, для флюсів ОФ-1, -2 вона більша на 60 К, а для ОФ-3 менша на 30 К. Для флюсу ОФ-4, який відрізняється підвищеним

Таблиця 1
Усередненні склади промислових флюсів, які використовувались у розрахунку

Марка флюсу	Склади флюсів у %								
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	FeO	CaF ₂	[O], %
АН-15	26	0	24	17	9	2	0	22	0,05
АН-47	30	5,5	12	15	8,5	16	2	11	0,06
АН-348	41	0	4	6	6	36	2	5	0,1
ФЦ-3	43	4	1	5	0	43	1	3	0,105
ФЦ-6	45	0	0	4	0	47	0	4	0,14
АНК-44	20	15	30	5	0	5	0	5	0,075
АНК-57	16	0	18	16	25	0	0	25	0,04
НФ-18М	20	0	26	18	8	5	3	20	0,045

Таблиця 2
Склад дослідних плавлених флюсів та вміст кисню у металі шва при наплавленні проволокою Св.-08 А та 30ХГС

Марка флюсу	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO + CaO	MnO	FeO	Св.-08А	30ХГС
							[O], %	[O], %
ОФ-1	27	26	17	19,8	8	2,2	0,119	0,059
ОФ-2	34	22	17	16,2	7	3,8	0,093	0,056
ОФ-3	30	11	15	30,4	12	1,6	0,07	0,046
ОФ-4	41	11	15	19,5	12	1,5	0,21	0,13
ОФ-5	17	25	20	24,5	12	1,6	0,09	0,068
ОФ-6	19	24	17	30,8	7,3	1,9	0,085	0,051
ОФ-7	23	23	16	27,1	7,7	3,2	0,087	0,053

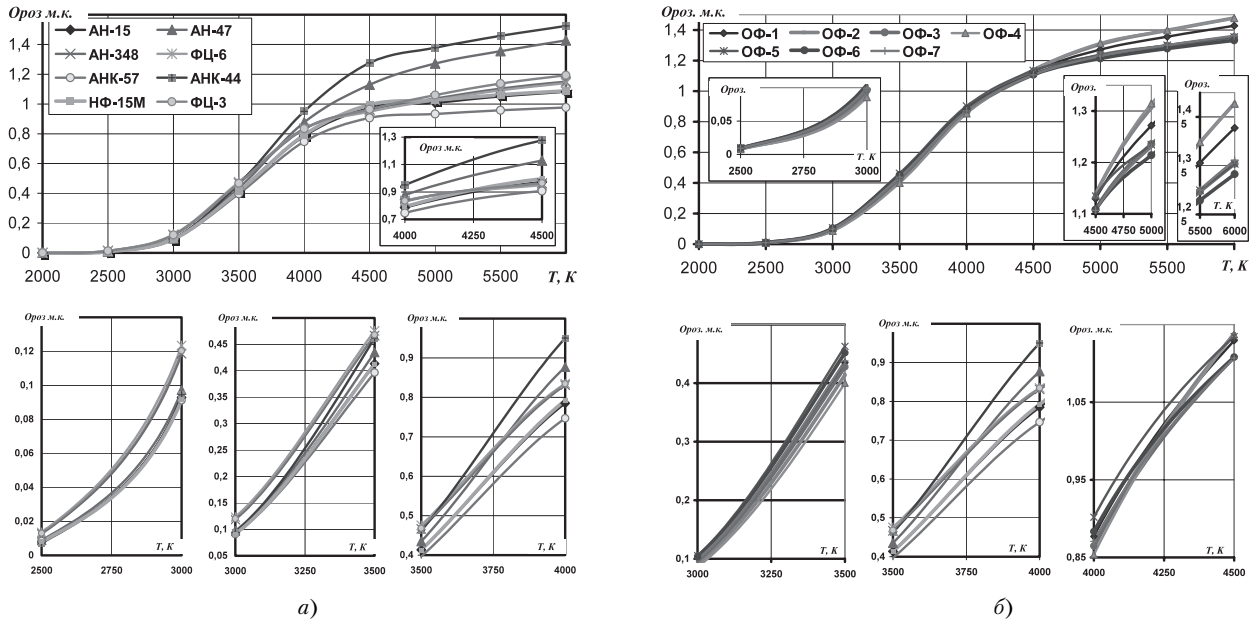


Рис. 1. Залежність вмісту розрахованого атомарного кисню у газовій фазі при термічній дисоціації складових промислових флюсів (а) та флюсів шлакової системи $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO-MnO-FeO-CaO}$

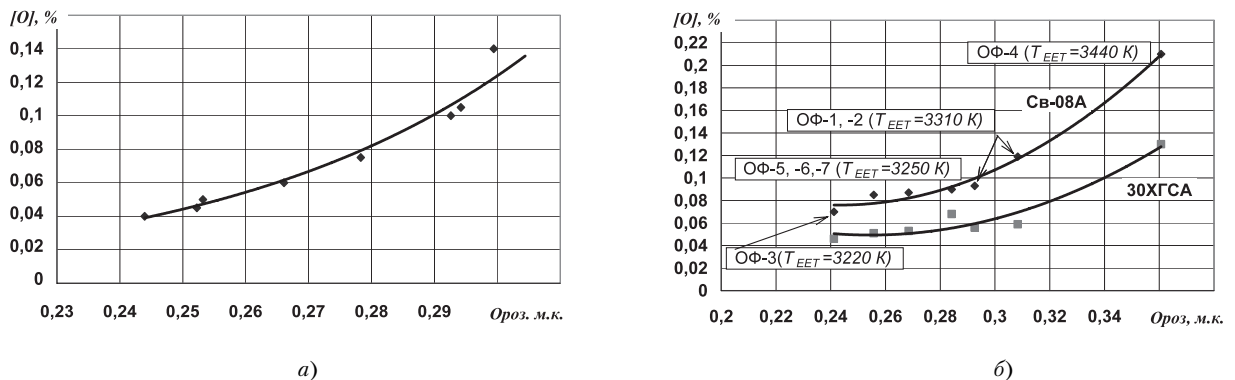


Рис. 2. Залежність вмісту кисню у металі шва від розрахованого атомарного кисню у газовій фазі при $EET = 3250\text{ K}$ для промислових марок флюсів (а) та для флюсів серії ОФ

вмістом TiO_2 , $T_{EET} = 3440\text{ K}$ (рис. 2, б). Основною відмінністю цього флюсу є те, що він є дуже короткий та має підвищену електропровідність, що повинно змінювати характер взаємодії на міжфазній поверхні газ–метал. При зварюванні під такими флюсами дуговий розряд є більш зжатым та заглибленим у основний метал. В результаті цього температурні умови у при поверхневому газовому прошарку Кнудсена змінюються в сторону підвищення температури, як і площа міжфазної поверхні газ–метал. Як наслідок маємо збільшення EET , яка відповідає вмісту кисню у металі шва.

Звертає на себе увагу те, що при використанні дроту 30ХГСА концентрація кисню у металі шва знижується, а характер залежності зберігається (рис. 2, б).

Зниження кисню у металі шва пояснюється наявністю підвищеного вмісту вуглецю у дроті, та його окисленням киснем газової фази, що очевидно знижує його мольну концентрацію на міжфазній поверхні газ–метал. Мольна концентрація кисню у газовій фазі змінюється від 0,24 до 0,36 молей, що співпадає з розрахованими даними для промислових флюсів.

В результаті можна стверджувати, що для флюсів, які забезпечують гарні зварювально-технологічні властивості еквівалентна-ефективна температура, при якій спостерігається залежність вмісту кисню у металі шва від мольної концентрації розрахованого атомарного кисню у газовій фазі дорівнює $3250 \pm 50\text{ K}$. Для флюсів, які мають інші фізичні характеристики

та не забезпечують отримання якісного шва значення ЕЕТ змінюються. Мольна концентрація кисню у газовій фазі змінюється від 0,24 до 0,36 молей та може служити критерієм окисної здатності флюсу, тобто його металургійною характеристикою.

Висновки

1. Показано, що у теперішній час не існують способу теоретичного розрахункового вмісту кисню у металі шва при зварюванні під флюсом, що пов'язано з обмеженнями при розгляді металургійної взаємодії, реакціями на границі шлак—метал та ігноруванням впливу газової фази на металургійні процеси.

2. На основі літературних даних, які характеризують величину числа Рейнольдса та Шмідта, а також величини критерію Дамкелера показано, що реакції на міжфазних границях газ—шлак та газ—метал протікають у дифузійному режимі, а киплячий прошарок розплавленого металу, де відбуваються абсорбція кисню з подальшою його дифузиею, контактує з газовою фазою через приповерхневий шар Кнудсена, властивості якого відрізняються від рівноважного стану газової фази.

3. Для характеристики процесів абсорбції кисню киплячим металом запропоновано використовувати поняття еквівалентно-ефективної температури (ЕЕТ), яка визначається з розрахункових даних термічної дисоціації оксидів флюсу при температурах характерних для газової фази.

4. Сформовані фізичні принципи моделювання розрахункового визначення кисню у шві на основі концентрації кисню у газовій фазі, який є наслідком термічної дисоціації оксидів флюсу, яка протікає за послідовно-паралельним механізмом, а його мольна концентрація визначається механізмом дисоціації та температурою.

5. Запропонована модель визначення вмісту кисню у металі шва на основі розрахунку концентрації атомарного кисню у газовій фазі та еквівалентно-ефективної температури.

6. Проведена перевірка адекватності запропонованої теоретичної моделі визначення вмісту кисню у металі шва при зварюванні під флюсом на прикладі промислових флюсів. В результаті порівняльного аналізу результатів розрахунку вмісту атомарного кисню у газовій фазі при різних температурах з концентрацією кисню у металі шва встановлено, що ЕЕТ для більшості флюсів, які мають гарні зварювально-технологічні властивості дорівнює 3250 К, а мольна концентрація кисню у газовій фазі — 0,24...0,3 молей.

7. При дослідженні флюсів однієї шлакової системи показано, що на величину ЕЕТ, яка відповідає вмісту кисню у металі шва певний вплив мають фізичні властивості шлаків, які визначаються співвідношенням компонентів.

8. Встановлено, що в результаті розрахунку мольної концентрації атомарного кисню у газовій фазі є можливість прогнозування вмісту кисню у металі шва. Розрахунок для більшості флюсів треба проводити для температури 3250 ± 50 К. Мольна концентрація атомарного кисню у газовій фазі, при цьому може змінюватися від 0,24 до 0,36, а вміст кисню у металі шва — 0,04...0,2 %.

Література

1. *Tuliani S. S., Boniszewski, T., Eaton, N. F.* Notch toughness of commercial submerged arc weld metal. *Welding and Metal Fabrication* 1969 37(8): 327–339.
2. *Н.Н. Потапов, С.А. Курланов.* Количественная оценка основности сварочных флюсов // *Сварочное производство.* — 1978. — № 9. С. 4–7.
3. *Потапов Н.Н.* Основы выбора флюсов при сварке сталей. — М.: Машиностроение, 1979. — 169 с.
4. *Mitra U., Eagar T.W.,* Slag-metal reactions during welding: Part I. Evaluation and reassessment of existing theories. *Metallurgical transactions.* Vol. 22B. February 1991. 65-s to 71-s.
5. *Технический справочник «Дуговая сварка под флюсом»,* ESAB, 2008.
6. *Сварочные материалы для дуговой сварки: Справочное пособие: В 2-х т. Т.1. Защитные газы и сварочные флюсы.* Под ред. Потапова Н.Н. — М.: Машиностроение, 1989. 544 с.
7. *Zeke, J.* Recommendations for expressing the flux basicity index by means of the oxygen anion ionic fraction. *Zvaranaie* 1980. № 29(7): 193–204.
8. *R. Quintana-Puchol; C. R. Gómez-Pérez; A. Cruz-Crespo; L. Perdomo-González,* Vitreous matrices evaluation of the $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-CaO-MgO}$ system for agglomerate fluxes across the optic basicity and structural-chemical criteria. *Soldag. insp. (Impr.)* vol. 16 no. 2 São Paulo Apr./June 2011.
9. *G.-h. Zhang, K.-c. Chou,* Model for evaluating density of molten slag with optical basicity. *Journal of Iron and Steel Research, International,* 2010. № 17(4): p. 1–4.
10. *C.B. Dallarn, S. Liu, D.L. Olson:* *Weld Journal,* 1985, vol. 64(3) pp. 140s–151s.
11. *Буки А.А.* Моделирование физико-химических процессов дуговой сварки. М.: Машиностроение. 1991 г., 287 с.
12. *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.
13. *Жданов Л.А.* Теоретичний розрахунок окислювальної здатності газової фази при електродуговому зварюванні та наплавленні. *Технологические системы.* 2009 р., № 1, с. 46–49.



14. *Жданов Л.А.* Особливості термічної дисоціації оксидів при зварюванні та наплавленні під флюсом. Технологические системы. 2008. № 2, с. 71–83.

15. *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).

16. *Жданов Л.А., Сливинский А.М., Котик В.Т.* Влияние углерода на металлургические процессы при электродуговой наплавке под флюсом // Прогресивна техніка і технологія машинобудування, приладобудування і зварювального виробництва. том IV — Київ, 1998.

17. *Mitra U., Eagar T.W.* Slag-metal reactions during welding: Part III. Verification of the theory. Metallurgical transactions. Vol. 22B February 1991: 83-s to 101-s.

18. vol. 62 (11), pp. 307s–312s.

19. *T.K. Sherwood and J. Wei:* Ind. Eng. Chem., 1957, vol. 49 (6), pp. 1030–1034.

20. *T. Poinsot, D. Veynante* Theoretical and numerical combustion 2005. R.T. Edwards. Inc. 527s.

21. *В. Дембовский* Плазменная металлургия. Прага, СНТЛ. Пер. с чешского. М. «Металлургия», 1981. 280 с.

22. Металлургия дуговой сварки. Взаимодействие металла с газами. Под ред. И.К. Походни. Киев «Наукова думка» 441 с.

23. *И.К. Походня, О.М. Портнов* Математическое моделирование абсорбции газов каплей электродного металла. Автоматическая сварка. 2003. № 6. — С. 5–8.

24. *Лакомский В.И.* Взаимодействие диатомных газов с жидким металлом при высоких температурах. Киев: Наукова думка, 1992. — 232 с.

25. *Лакомский В.И., Григоренко Г.М.* О поглощении водорода и азота металлом при электродуговой сварке. Автоматическая сварка. 1964. № 11 — С. 1–9.