

УДК 621.791.75

Жданов Л.А., к.т.н., доц.; Стреленко Н.М., к.т.н., доц.; Нетяга А.В. асп.
НТУУ «Київський політехнічний інститут» м. Київ, Україна

ТЕРМОДИНАМІЧНЕ ПРОГНОЗУВАННЯ УТВОРЕННЯ НЕМЕТАЛЕВИХ ОКСИДНИХ ВКЛЮЧЕНЬ В МЕТАЛІ ШВА ПРИ ЕЛЕКТРОДУГОВОМУ ЗВАРЮВАНІ ПІД ВИСОКОКРЕМНІСТИМИ ФЛЮСАМИ

Zhdanov L., Strelenko N., Netyaga A.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (strelenkong@gmail.com)

THERMODYNAMIC FORECASTING OF FORMATION NONMETALLIC OXIDIC INCLUSIONS IN SEAM METAL AT ARC WELDING UNDER HIGHSILICEOUS GUMBOILS CONTENT

В процесі електродугового зварювання під флюсом утворюються неметалеві включення різної морфології, із змінною об'ємною долею їх в металі шва. Розроблена фізична модель утворення оксидних неметалевих включень в металі шва. Запропонована термодинамічна модель утворення оксидних неметалевих включень в металі шва при електродуговому зварюванні під флюсом на основі створеної фізичної моделі. Проведені металографічні дослідження з вивчення вмісту неметалевих включень в металі шва і їх морфології, показано адекватність запропонованої термодинамічної моделі.

Ключові слова: оксидні неметалеві включення, зварювання під флюсом, вміст неметалевих включень при зварюванні, термодинамічна модель, оксиди кремнію та марганцю, хімічна термодинаміка, зварювальні флюси, моделювання.

Однією з актуальних проблем електродугового зварювання під флюсом є зниження рівня неметалевих оксидних включень у металі шва та оптимізація їх морфології. Технологічні та металургійні аспекти цієї проблеми висвітлені у багатьох роботах. Однак, в більшості випадків розглянуті конкретні композиції флюс-дріт або вплив певних розкислювачів на формування структури металу шва та його механічні властивості. Відповідно, сформовані вимоги та рекомендації по зниженню ендогенних неметалевих включень у металі шва, що дозволяє у певній мірі підвищити його механічні властивості при використанні систем флюс-дріт, що досліджувались. Формування загальних висновків з впливу певних композицій зварювальних матеріалів та співвідношення компонентів у складі флюсу на вміст неметалевих включень у металі шва, повинно бути здійснено на основі моделювання процесів утворення включень використовуючи принципи рівноважної термодинаміки розчинів. Розроблена модель дозволить проводити прогнозування вмісту неметалевих оксидних включень у металі шва при використанні флюсів різного складу.

Постановка задачі

Метою роботи є розробка розрахункової термодинамічної моделі утворення оксидних неметалевих включень у металі шва при дуговому зварюванні під флюсами загального призначення. Визначення її адекватності при використанні флюсів різних шлакових систем та при змінному співвідношенні компонентів у складі флюсу.

Для вирішення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- сформулювати основні принципи застосування рівноважної хімічної термодинаміки для моделювання процесу утворення оксидних неметалевих включень у металі шва;
- створити розрахункову термодинамічну модель визначення вмісту оксидних неметалевих включень у металі шва при зварюванні під флюсом;
- провести експериментальні дослідження для оцінки адекватності розробленої моделі утворення оксидних неметалевих включень.

Для вирішення поставлених задач необхідно розробити фізичну та термодинамічну модель процесу утворення неметалевих включень у металі шва із рахуванням всіх взаємодіючих фаз та масопотоків, які впливають на формування зварювальної ванни. Провести наплавлення дослідних зразків при використанні флюсів різних шлакових систем загального призначення та металографічні дослідження металу шва. Визначити вміст легуючих елементів у металі шва, які визначаються окислювально-відновлювальними процесами.

Провести аналіз отриманих результатів та сформулювати рекомендації по застосуванню розробленої термодинамічної моделі.

Основні принципи застосування хімічної термодинаміки при розрахунку металургійних процесів і особливості її використання в умовах електродугового зварювання під флюсом

Процес електродугового зварювання засновано на фізичних і хімічних перетвореннях речовини та енергії. При зварюванні протікають такі процеси, як розчинення і виділення речовини із розчину, випаровування, дисоціація хімічних сполук та багатоатомних газів, іонізація газів, взаємодія компонентів газової, шлакової та металеві фаз. Протікають обмінні та окислювальні процеси, різноманітні хімічні реакції на міжфазних границях та безпосередньо в середині фаз [1].

Вид і кількість одночасних фізико-хімічних явищ, що протікають у реакційній зоні зварювання, залежить від способу і режиму зварювання, виду, типу, індивідуальних властивостей та складу присадкових матеріалів і матеріалів, що зварюються. Базою для їх вивчення при зварюванні є хімічна рівноважна термодинаміка – наука, що дозволяє оцінити межі і напрямки процесів, що супроводжуються зміною їх енергетичних ефектів. При цьому за допомогою основних термодинамічних характеристичних функцій учасників реакції (ентальпії, ентропії та теплоємності) рівноважна хімічна термодинаміка дозволяє провести визначення напрямку протікання хімічних реакцій, температури початку та закінчення процесу дисоціації з'єднань, температуру переходу елементів та з'єднань у рідкий і газоподібний стан, склад фаз, що з'являються в результаті реакції [1, 2].

При зварюванні в процесі охолодження газу частково виділяються, проте значна кількість їх залишається в металі. Протікання всіх процесів відбувається з великою швидкістю. Однак, у зв'язку з короткочасністю існування розплаву та постійним оновленням взаємодіючих фаз, частина реакцій і процесів в зоні зварювання може не доходити до повного завершення і, отже, не досягати рівноважного стану. Це і визначає фізико-хімічні та механічні властивості зварного шва [2].

Насичення металу газами призводить, як показали численні експерименти, до зміни механічних властивостей металу і до порушення суцільності шва. Наявність неметалевих включень в металі різко знижує його пластичність і ударну в'язкість. Присутність неметалевих включень в наплавленому металі сприяє також утворенню тріщин у зварному з'єднанні. Тому важливо знати кінетику процесів насичення металу газами і виділення їх з металу [2].

Фізична модель утворення неметалевих включень у металі шва при електродуговому зварюванні під флюсом

Для створення фізичної схеми утворення неметалевих включень у металі шва при електродному зварюванні під флюсом, необхідно знати які фізико-хімічні процеси протікають при зварюванні під флюсом.

Процеси, які протікають при зварюванні під флюсом, відрізняються від інших електродугових способів зварювання тим, що він має в плавильній зоні три взаємодіючі багатокомпонентні фази: розплавлений шлак, розплавлений метал і газ. Таким чином вважається, що основний масообмін елементами протікає на грани шлак-метал.

Між рідким металом каплі на кінці електрода та переднім кінцем зварювальної ванни горить дуга. Розплавлений флюс утворює шлаковий купол, який закриває зварювальну дугу від взаємодії з повітрям. Газоподібні оксиди і пари елементів зі стовпа дуги можуть переходити через шлаковий купол в повітря. Зворотній масообмін, з повітря в зону зварювання, менш вірогідний, хоча інколи відбувається потрапляння азоту з повітря в зону зварювання. Над поверхнею шлакової ванни і коркою знаходиться частково розплавлений флюс.

Електродний метал переноситься у зварювальну ванну дрібними або крупними краплями, які замикають або укорочують дуговий проміжок, і краплями, які сповзають по шлаковому куполу. Газові бульбашки спливають з рідкого металу в шлак та разом з газовими бульбашками потрапляють з шлаку в повітря. Цьому заважає частково розплавлений флюс, тому на поверхні шлакової корки утворюються пори. Дрібні краплі рідкого металу важчі шлаку, тому вони осідають у зварювальну ванну. Шлакові краплі легші металу, тому вони піднімаються вгору зварювальної ванни та переходять в шлак. Краплі шлаку, які не встигли вийти з ванни та перейти в шлак, утворюють шлакові екзогенні включення.

Дуга інтенсивно плавить і випаровує електродний метал. Переднім фронтом дуги плавиться і випаровується флюс та основний метал. Чим більша напруга на дузі, тим більший дуговий проміжок і швидше плавиться та випаровується шлак. В дуговому проміжку, в наслідок високої температури, оксиди та інші сполуки дисоціюють.

Стовп дуги від електрода до ванни розширюється, тим самим створює потужний плазмовий потік від електрода до ванни. Плазмовий потік змушує рухатись пари електродного металу і шлаку, дрібні краплі і гази до зварювальної ванни. На границі плазмової дуги температура плазми знижується, тим самим утворює оксиди,

які конденсують в шлак. В приелектродній області елементи можуть як розчиняються у зварювальній ванні, так і випаровуватись з розчину.

На основі вище сказаного, було розроблено фізичну структурну схему утворення оксидних неметалевих включень при зварюванні під флюсом (рис. 1) [3].

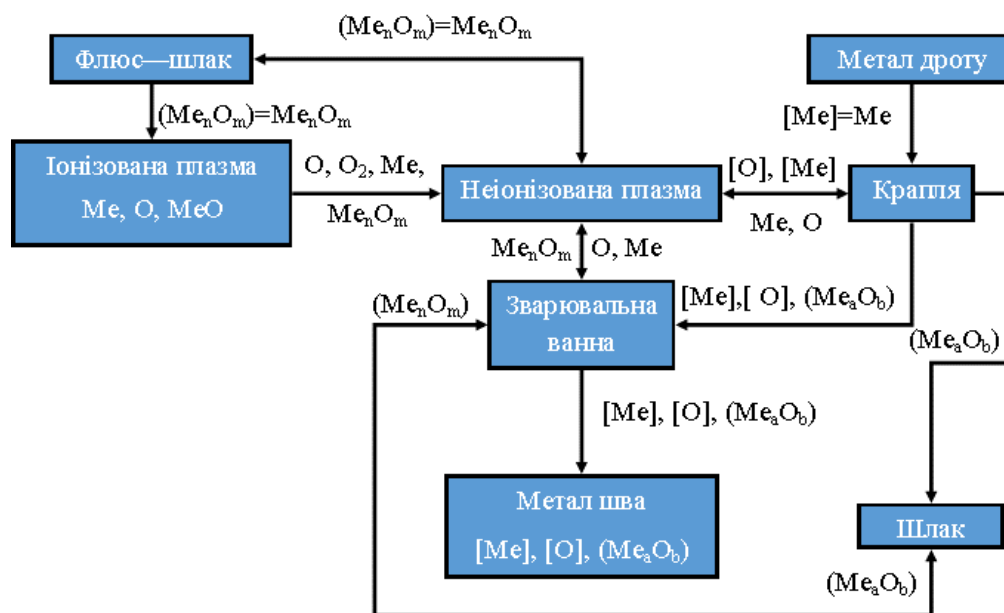


Рис. 1. Фізична структурна схема утворення оксидних неметалевих включень в металі шва при електродуговому зварюванні під флюсом

Метал, який утворює оксидні неметалеві включення, потрапляє у зону зварювання з металу дроту через краплю. Температура краплі дозволяє протікати реакції утворення оксидних неметалевих включень. З іншого боку, з розплавленого флюсу, в іонізовану та неіонізовану плазму потрапляє оксид цього металу. В іонізованій плазмі дуже висока температура, тому він частково розпадається на компоненти, і всі ці компоненти та сам оксид, який частково залишився, переходять у неіонізовану плазму. З неіонізованої плазми частина оксиду переходить назад у розплавлений флюс. Інші всі компоненти переходять у вигляді газів у зварювальну ванну та краплю. У той же час, з краплі переходить метал, який утворює оксидні включення, та розчинений кисень у неіонізовану плазму. Також сама крапля потрапляє у зварювальну ванну. У краплі міститься метал, який утворює оксидні включення, розчинений кисень та оксид який утворився на стадії краплі. У зварювальній ванні також протікає реакція утворення оксидних неметалевих включень. Ця реакція протікає до температури солідуса. Зварювальна ванна та крапля контактують з розплавленим шлаком, який в подальшому утворює шлакову кірку. Тому, на цій границі, відбувається перехід утвореного оксиду металу в шлак та перехід оксиду металу який знаходився у флюсі у зварювальну ванну. При подальшому охолодженні, зварювальна ванна застигає та утворює метал шва. У цьому металі шва залишаються оксиди металу, які не встигли вийти в шлак, та нерозчинений кисень і метал, які не прореагували між собою.

Термодинамічна модель визначення вмісту неметалевих оксидних включень у металі шва при електродуговому зварюванні під флюсом

Нами було розроблена термодинамічна модель, за допомогою якої можна визначити вміст неметалевих оксидних включень в металі шва [3, 4].

Представлена структурна схема термодинамічної моделі (рис. 2) складається з 4-х основних блоків, в які закладаються початкові дані необхідні для розрахунку:

- 1) концентрація хімічних елементів в металі шва;
- 2) термодинамічні показники утворення оксидних неметалевих включень;
- 3) визначення коефіцієнта активності кисню в металі шва;
- 4) реакція утворення оксидних неметалевих включень.

В блоці концентрації хімічних елементів у металі шва представлені дані хімічного аналізу металу наплавлених валиків (табл. 1) та аналіз зварювального дроту (табл. 2). Хімічний склад металу наплавлених валиків отриманий за допомогою методу «мокрої хімії».

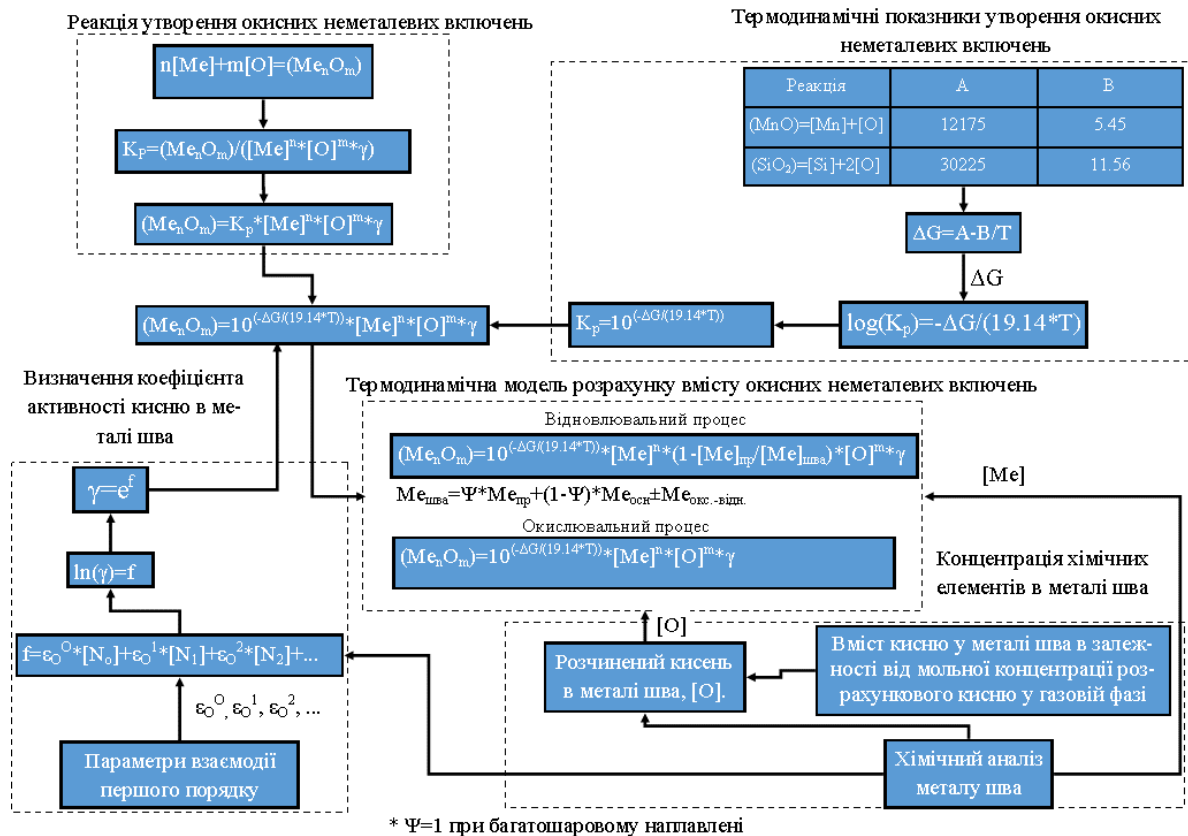


Рис. 2. Структурна схема термодинамічної моделі з визначення вмісту неметалевих окисних включень в металі шва при електродуговому зварюванні під флюсом [4]

Таблиця 1

Хімічний склад наплавленого металу

Марка зварювального флюсу	Масова частка елементів, %				
	C	Si	Mn	S	P
ESAB ОК 10.71	0.05	1.214	2.58	0.022	0.028
АН-348 А	0.035	0.97	2.57	0.031	0.029
ОСЦ-45	0.04	0.2	2.3	0.023	0.026
АН-60	0.045	1.065	2.81	0.035	0.026
АН-47	0.05	0.826	1.98	0.026	0.026
АН-44	0.035	0.749	0.34	0.029	0.024

Таблиця 2

Хімічний склад зварювального дроту

Зварювальний дріт	Масова частка елементів, %				
	Si	Mn	Al	S	P
Св-08Г2С	0.446	2.03	0.03	0.016	0.026

Таблиця 3

Залежність констант рівноваги від температури [5]

Реакція	log(Kp)=-A/T+B	
	A	B
(SiO ₂)=[Si]+2[O]	30225	11.56
(MnO)=[Mn]+[O]	12175	5.45

У блоці термодинамічних показників утворення окисних неметалевих включень наведені експериментальні дані протікання хімічних реакції з розчиненим киснем в металі шва [3,4]. Температурні залежності констант рівноваги наведено в табл. 3 [5].

Константа рівноваги через термодинамічні показники хімічної реакції:

$$\log(K_p) = -A/T + B \quad (1)$$

$$K_p = 10^{(-A/T+B)} \quad (2)$$

Блок визначення коефіцієнта активності кисню в металі шва. В параметрах взаємодії, запропонованою Вагнером для багатокомпонентних розчинів [6,7], враховано взаємний вплив компонентів на коефіцієнти їх активності. Коефіцієнт активності кисню визначається за рівнянням:

$$f = \varepsilon_O^0 * [N_O] + \varepsilon_O^1 * [N_1] + \varepsilon_O^2 * [N_2] + \dots \quad (3)$$

де $\varepsilon_O^0, \varepsilon_O^1, \varepsilon_O^2$ – параметри взаємодій першого порядку для визначення коефіцієнта активності кисню; $[N_O], [N_1], [N_2]$ – мольна концентрація елементів системи.

Останнім блоком, який задає входні параметри є сама хімічна реакція утворення оксидних неметалевих включень. В даному випадку реакція має вигляд:



де n, m – стехіометричні коефіцієнти;

$[Me], [O]$ – вихідні продукти у вільній металевій фазі;

(Me_nO_m) – продукт реакції у шлаковій фазі.

Константа рівноваги виражається через мольні концентрації учасників реакції та їх коефіцієнти активності. Коефіцієнт активності кисню знаходиться за допомогою розрахунків приведених в попередньому блоці. Коефіцієнт активності $[Me]$ приймається рівним 1.

$$K_p = (Me_nO_m) / ([Me]^n * [O]^m * \gamma) \quad (5)$$

де γ – коефіцієнт активності кисню;

$[Me], [O]$ – мольні концентрації сполук (моль).

Мольна концентрація оксидних включень:

$$(Me_nO_m) = K_p * [Me]^n * [O]^m * \gamma \quad (6)$$

При поєднанні всіх блоків структурної схеми в одне рівняння отримуємо розрахункову термодинамічну модель що дає змогу розрахувати мольний вміст оксидних неметалевих включень в металі шва.

Так як розрахунок проводиться для випадку багатошарового наплавлення металу, то необхідно враховувати коефіцієнт наплавленого металу, який дає змогу отримати хімічний склад металу зварного шва:

$$Me_{шва} = \Psi * Me_{np} + (1 - \Psi) * Me_{осн} \pm Me_{окс.-відн.} \quad (7)$$

де Ψ – коефіцієнт наплавленого металу ($\Psi = 1$).

Отримана розрахункова термодинамічна модель має два шляхи рішення. Перший розрахунок виконується коли реакція має відновлювальний характер. Другий – реакція має окислювальний характер. Константа рівноваги для розрахунку береться з блоку термодинамічних показників.

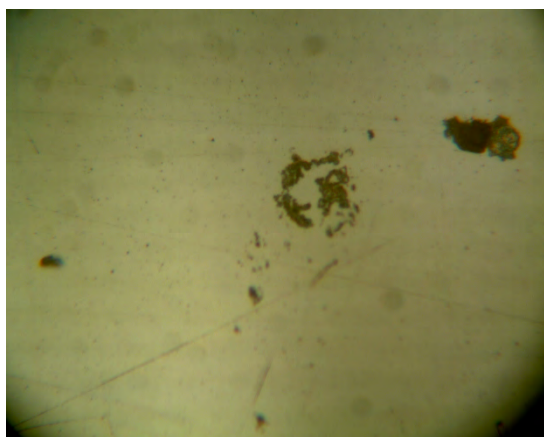
$$(Me_nO_m) = 10^{(-A/T+B)} * [Me]^n * (1 - [Me]_{np} / [Me]_{шва}) * [O]^m * \gamma \quad (8)$$

$$(Me_nO_m) = 10^{(-A/T+B)} * [Me]^n * [O]^m * \gamma \quad (9)$$

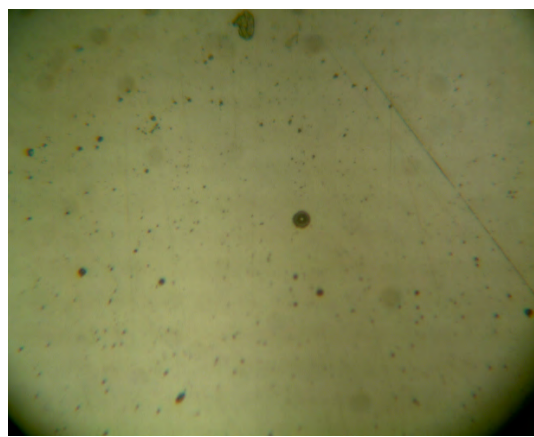
Залежність $(1 - [Me]_{np} / [Me]_{шва})$ дає можливість оцінити яка кількість компоненту переходить у вигляд неметалевих включень.

Експериментальне підтвердження термодинамічної моделі з визначення вмісту неметалевих оксидних включень в металі шва при електродуговому зварюванні під флюсом

Для аналізу мікроструктури шва проводилися дослідження неметалічних включень в металі шва, отриманих під флюсами ОК 10.71 (агломерований флюс), АН-348 А, ОСЦ-45, АН-47, АН-44 (плавлений флюс), АН-60 (пемзовидний флюс). Всі флюси є висококремнієвими і відносяться до однієї шлакової системи $SiO_2 - MnO - CaO - Al_2O_3$.



ОК 10.71



АН-348 А

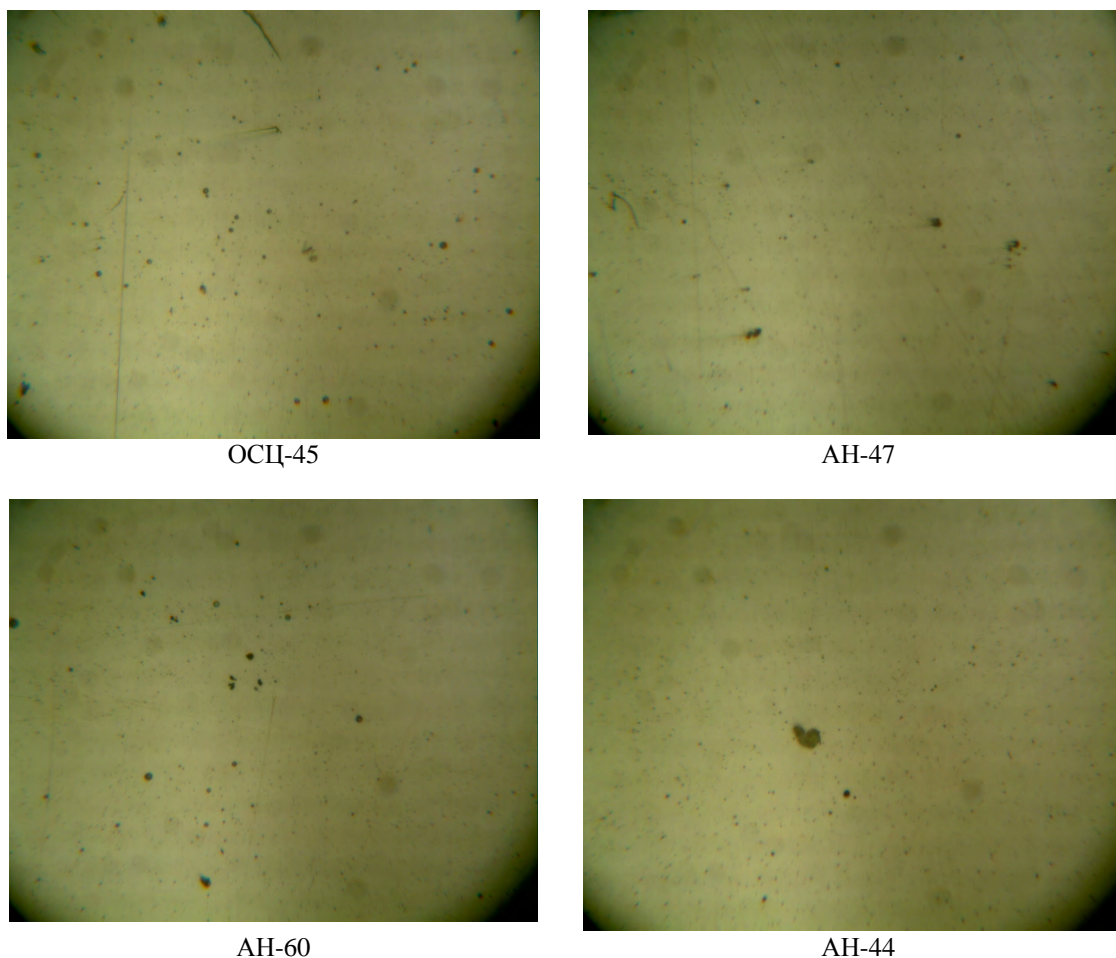


Рис. 3. Неметалеві оксидні включення в металі шва при зварюванні промисловими флюсами різних марок з краю валика (x 640)

Завдяки представленим зображенням мікрошліфів наплавлених валиків (рис. 3), можна провести візуальний аналіз вмісту оксидних неметалевих включень в металі шва при зварюванні під різними марками флюсу (табл.4).

Аналіз вмісту відбувається за такими критеріями:

1) Розмір включень SiO_2 , MnO :

- 1 – маленькі, діаметр менше 1 мкм;
- 2 – середні, діаметр від 1 до 2 мкм;
- 3 – великі, діаметр від 3 до 5 мкм;
- 4 – дуже великі, діаметр більше 5 мкм.

2) Наявність скупчень різних оксидних включень:

- «-» – відсутні скупчення включень;
- «+» – присутні скупчення включень;
- «++» – велика кількість скупчень включень.

Таблиця 4

Аналіз вмісту неметалевих включень у зразках

Флюс	Розмір включень SiO_2 , мкм				Розмір включень MnO , мкм				Наявність скупчень
	<1	1-2	3-5	>5	<1	1-2	3-5	>5	
ОК 10.71	3	2	-	-	3	-	-	-	+
АН-348 А	3	3	1	-	2	2	1	1	-
ОСЦ-45	2	3	-	-	1	3	1	-	-
АН-60	2	1	2	-	1	2	2	-	-
АН-47	2	2	-	-	1	-	-	-	+
АН-44	3	3	-	1	3	1	-	-	+

Встановлено, що в залежності від складу флюсу характер насичення метала шва неметалевими включеннями (НВ) змінюється. Форма та розмір включень також суттєво змінюється. Спостерігається накопичення, укрупнення та зміна форми НВ у верхній частині зварювальної ванни, що свідчить про їх спливання з можливістю подальшого асимілювання їх шлаком. У зонах розташування та накопичення НВ простежуються масопотоки у зварювальній ванні, які відповідають існуючим моделям переміщення розплавленого металу [8].

Найбільш дрібнодисперсний характер НВ спостерігається на пемзовидною флюсі АН-60 і на плавленому флюсі ОСЦ-45, але кількість цих включень (рис. 3) набагато більше.

Висновки

1) встановлено, що при електродуговому зварюванні під флюсом певної газової системи на основі комплексу оксидів $\text{SiO}_2\text{-MnO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ утворюються неметалеві включення різної морфології, зі змінною об'ємною часткою їх у металі шва. Морфологія НВ і їх розмір безпосередньо пов'язані зі структурою флюсу;

2) проаналізувавши процес електродугового зварювання під флюсом, була розроблена фізична модель утворення неметалевих оксидних включень у металі шва;

3) запропонована термодинамічна модель утворення неметалевих оксидних включень в металі шва при електродуговому зварюванні під флюсом на основі створеної фізичної моделі;

4) отримані експериментальні дані на мікрошліфах якісно підтверджують можливість використання запропонованої термодинамічної моделі для прогнозування неметалевих включень.

Аннотация. При электродуговой сварке под флюсом образуются неметаллические включения разной морфологии, с переменной объемной долей их в металле шва. Разработана физическая модель образования неметаллических оксидных включений в металле шва. Предложена термодинамическая модель образования оксидных неметаллических включений в металле шва при электродуговой сварке под флюсом на основе созданной физической модели. Проведенные металлографические исследования по изучению содержания неметаллических включений в металле шва и их морфологии, показали адекватность предложенной термодинамической модели.

Ключевые слова: оксидные неметаллические включения, электродуговая сварка под флюсом, содержание неметаллических включений в металле шва, термодинамическая модель, оксид кремния, оксид марганца, химическая термодинамика, сварочные флюсы.

Abstract.

At arc welding under gumboil are formed nonmetallic inclusions of different morphology, with their variable volume fraction in seam metal. The physical model of formation of nonmetallic oxidic inclusions in seam metal is developed. The thermodynamic model of formation of oxidic nonmetallic inclusions in seam metal at arc welding under gumboil on the basis of the created physical model is offered. The conducted metalgraphic researches on studying of content of nonmetallic inclusions in metal of a seam and their morphology, have shown adequacy to the offered thermodynamic model

Purpose. Creation of settlement thermodynamic model of formation of oxidic nonmetallic inclusions in seam metal at arc welding under gumboil of general purpose. Determination of adequacy to the offered model when using gumboils of various slag systems, and at a variable ratio of components as a part of gumboil.

Design/methodology/approach formulate the basic principles of application of equilibrium chemical thermodynamics for modeling of process of formation of oxidic nonmetallic inclusions in seam metal; create thermodynamic model of determination of content of oxidic nonmetallic inclusions in seam metal at arc welding under gumboil; conduct pilot studies for an assessment of adequacy to the developed model of formation of oxidic nonmetallic inclusions.

Findings. It is offered the thermodynamic model of formation of oxidic nonmetallic inclusions in seam metal at arc welding under

Keywords: oxidic nonmetallic inclusions, arc welding under gumboil, the content of nonmetallic inclusions in seam metal, thermodynamic model, silicon oxide, manganese oxide, chemical thermodynamics, welding gumboils.

Бібліографічний список використаної літератури

1. *Жданов Л.А.,* Стреленко Н.М., Коваленко В.Л. Фізико-хімічні процеси при зварюванні та наплавленні. Методичні вказівки до виконання курсової роботи. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 52 с.
2. *Под ред. акад. Патона Б.Е.* Технология электрической сварки металлов и сплавов плавением. – М.: «Машиностроение», 1974. – 768 с.
3. *Жданов Л.А.,* Нетяга А.В. Розрахунок вмісту неметалевих включень у металі шва за допомогою рівноважної термодинаміки // Матеріали сьомої всеукраїнської міжгалузевої науково-технічної конференції студентів, аспірантів та наукових співробітників „Зварювання та споріднені технології і процеси”. – Київ: 14 – 16 травня 2014. – С. 13.
4. *Жданов Л.А.,* Нетяга А.В. Термодинамічна модель утворення оксидних неметалевих включень у металі шва при дуговому зварюванні під флюсом // VIII міжнародна конференція молодих учених та спеціалістів «Зварювання та споріднені технології». – Київ: 20-22 травня 2015 року. – С. 212.

5. Л.А. Чернова, Г.Г. Михайлов Термодинамика процессов взаимодействия кислорода с металлическими расплавами систем Fe-V-Cr (Mn)-Si-O-C // Вестник ЮУрГУ. – 2005. – № 3. – С. 24-27.
6. Цымбал В.П. Математическое моделирование металлургических процессов. М.: Металлургия. 1986. – 240 с.
7. Коновалов А.В., Куркин А.С. Теория сварочных процессов. –М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 748 с.
8. Жданов Л.А., Нетьяга А.В. Дослідження особливостей утворення неметалевих включень при зварюванні під флюсами загального призначення // Восьма всеукраїнська міжгалузева науково-технічна конференція студентів, аспірантів та наукових співробітників „Зварювання та споріднені процеси і технології”. – Київ: 10-12 червня 2015 року. – С. 51.

References

1. Zhdanov, L.A., Strel'chenko, N.M, and Kovalenko, V.L. (2012), Fíziko-khímíchní protsesi pri zvaryuvanní ta naplavlenní", Metodíchní vkažívki do vikonannya kursovoi roboti. NTUU «KPI», Kyiv, Ukraine.
2. Patona V.Ye (ed.), (1974), Tekhnologiya elektricheskoy svarki metallov i splavov plavlenim, Mashinostroyeniye, Moscow, Russian.
3. Zhdanov, L.A. and Netyaga, A.V. (2014), Rozrakhunok vmístu nemetalevikh vklyuchen' u metalí shva za dopomogoyu rívnovazhnoi termodinamíki, Materíali s'omóí vseukraíns'koi mízhgaluzevoi naukovo-tekhníchnoi konferentsíi studentív, aspírantív ta naukovikh spívrobítnikív "Zvaryuvannya ta sporídnenní tekhnologii í protsesi", Kyiv, Ukraine.
4. Zhdanov, L.A. and Netyaga, A.V. (2015), Termodinamíchna model' utvorenniya oksidnih nemetalevikh vklyuchen' u metalí shva pri dugovomu zvaryuvanní píd flyusom, VÍÍ mízhnarodna konferentsíya molodíkh ucheníkh ta spetsíalístív «Zvaryuvannya ta sporídnenní tekhnologii», Kyiv, Ukraine.
5. Chernova, L.A., Mikhaylov, G.G. (2005), Termodinamika protsessov vzaimodeystviya kisloroda s metallicheskimi rasplavami sistem Fe-Cr-V (Mn) -Si-O-C, Vestnik YUUrGU, no 3. pp. 24-27.
6. Tsyimbal, V.P. (1986), Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov, Metallurgiya, Moscow, Russian.
7. Kononov, A.V. and Kurkin A.S. (2007), Teoriya svarochnykh protsessov, MGTU im. N.E. Bauman, Moscow, Russian.
8. Zhdanov, L.A. and Netyaga A.V. (2015), Doslídzheniya osoblivostey utvorenniya nemetalevikh vklyuchen' pri zvaryuvanní píd flyusami zagal'nogo príznachennya, Vos'ma vseukraíns'ka mízhgaluzeva naukovo-tekhníchna konferentsíya studentív, aspírantív ta naukovikh spívrobítnikív "Zvaryuvannya ta sporídnenní protsesi í tekhnologii", Kyiv, Ukraine.

Подана до редакції 05.04.2016