

**Національна академія наук України  
Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова**

**DOI 10.52150/2522-9117-2021-conferens**



**Всеукраїнська науково-технічна конференція  
«НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ»**

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова  
Національної академії наук України**

**24 червня  
м. Дніпро  
2021**

**Тематичні напрямки роботи конференції:**

Назва секції	Стор.
металургія чавуну та сталі: технології, інновації, якість	4
електрометалургія	22
технології позапічної обробки чавуну та сталі	23
металознавство та термічна обробка сталі	29
прогресивні технології обробки металу тиском	37

## НЕВИРІШЕНІ ЗАДАЧІ ТА АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ЧОРНОЇ МЕТАЛУРГІЇ УКРАЇНИ

Л.Г.Тубольцев, к.т.н.

Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України, Дніпро

Протягом останніх 30 років чорна металургія України працює вкрай нестабільно, а в останні 10 років виробництво металопродукції знаходиться на мінімально можливому рівні. З моменту отримання Україною незалежності перед металургією загалом ставилися амбітні завдання щодо докорінної модернізації, виходу технічного рівня виробництва на рівень кращих закордонних зразків та зменшення витрат енергоресурсів. Визнаючи певні досягнення, загалом можна констатувати, що амбітні завдання так і не було виконано. Передача металургії у приватні руки ще більше погіршила ситуацію.

Можна навести декілька аспектів, що перешкоджають перспективному розвитку металургії України.

Орієнтація металургії на експорт була вимушеною мірою для збереження виробництва, але експорт 80-85% металопродукції є важкою ціною для України, що має розвинену сировинну базу залізородної сировини, але обмежену кількість енергоресурсів.

Металургійне виробництво України все більше орієнтується на експорт сировинних видів продукції та напівфабрикатів, що мають стабільний попит на світовому ринку, але мають низку додану вартість. Україна все більше потрапляє у зону ризику «сировинного прокляття».

На сучасному етапі розвитку у світі енергозберігаючих технологій металургійні підприємства України практично не використовують можливості наукового потенціалу країни, що все більше поглиблює розрив між закордонними та вітчизняними металургійними технологіями виробництва.

Розроблені у теоретичному плані технологічні рішення вітчизняних науковців потребують створення дослідно-промислових установок, але для цього в країні серйозно бракує інвестицій. Власники металургійних підприємств не враховують інтереси держави та шукають тільки можливість отримання прибутку, купуючи та створюючи металургійні підприємства за кордоном, а не в Україні.

Металургійне виробництво, як базова галузь промисловості, потребує системного програмного підходу до свого розвитку, але держава не вважає необхідним навіть символічно опікуватися базовими галузями промисловості, що на нашу думку є вкрай необачним. Стратегія розвитку країни визначається рішеннями на вищому державному рівні. Нами запропоновані принципіальні підходи до посилення державного впливу та розвиток металургії.

Протягом багатьох років зусилля вчених і виробників були спрямовані на вдосконалення технологій отримання металів. Однак, практично всі відомі технології використовують найдавніші закономірності відновних реакцій з використанням вуглецю. І якщо раніше це не викликало занепокоєння людства, то сьогодні вуглецеві технології все більше піддаються критиці. Це ставить серйозні завдання перед металургійною наукою. У технологічному плані основні зусилля наукових досліджень повинні бути спрямовані на вирішення питань енергозбереження та екології.

Удосконалення технологій неможливо без розробки теоретичних положень перспективних технологій. У світовій практиці розробляється кілька варіантів вдосконалення технологій, серед яких можна відзначити наступні:

Серед передових технологій у доменному виробництві найкращі результати з економії енергоресурсів і зниження викидів CO<sub>2</sub> досягаються при реалізації енергозберігаючої технології ГВГ (гарячі відновлювальні гази). Наукові розробки передбачають можливість подальшого зниження витрат коксу за рахунок використання процесів газифікації вугілля, а також очищених вторинних газів – доменного та конвертерного. Заслужовує уваги також технологія застосування шихти з підвищеним вмістом заліза.

У галузі сталеплавильного виробництва безумовний пріоритет мають наукові розробки з удосконалення виплавки сталі у конвертерах та розроблення засобів корінного поліпшення

якості сталі. А удосконалення та реалізація нових процесів суміщеного розливання та прокатки, які поки що не використовуються в Україні, дозволяє досягати низьких показників енергоємності готової продукції.

Напрями розвитку прокатного виробництва пов'язані з реалізацією прогресивного обладнання та автоматизацією процесів виробництва прокату.

Слід також зазначити, що більшість прогресивних напрямків удосконалювати технологію знаходить відображення в тематиці ІЧМ, однак є чимало білих плям.

Пріоритетом держави має бути подальший розвиток науки, причому не тільки фундаментальних досліджень, але і прикладних. Результати повинні приносити практичні плоди для суспільства і держави, відбиватися на базових показниках стану економіки, на валовому внутрішньому продукті (ВВП), на надходженнях валюти від експорту продукції тощо. Україна зобов'язана повернути собі статус держави з розвинутою фундаментальною і прикладною наукою і передовою промисловістю.

## МЕТАЛУРГІЯ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ: ТЕХНОЛОГІЇ, ІННОВАЦІЇ, ЯКІСТЬ

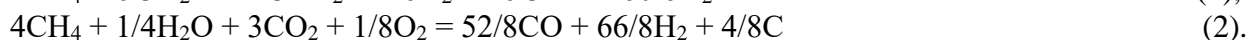
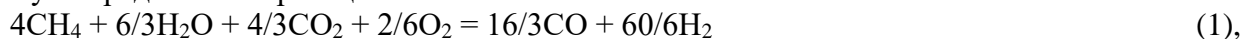
УДК 544.3:66.094.3:547.211

### ТЕРМОДИНАМІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КОНВЕРСІЇ МЕТАНУ

О.М. Гришин, к.т.н. доцент

Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Конверсія метану із залученням комплексного окислювача, в залежності від співвідношення C/O, реалізується в рамках одно- і двофазної систем та в загальному вигляді, може бути представлена реакціями:



Ця трикомпонентна і однофазна (або двофазна) система має  $c = n + k - f = 2 + 3 - 1 (2) = 4(3)$  ступені свободи. Рівноважний склад газової фази при постійному тиску, що характерно для металургійних процесів, є функцією загального тиску, температури, співвідношення C/O та 2H/C. Виконане термодинамічне моделювання з використанням пакету «HSC Chemistry 5.1» для двох варіантів систем показало, що вже в області низьких температур (~ 373K) рівноважна концентрація O<sub>2</sub> практично дорівнює нулю, а CH<sub>4</sub> при T > 1100K також на 1 ... 2 порядки нижче інших компонентів. Однак, враховуючи значущість цих компонентів у певних температурних інтервалах, розрахунок виконаний за їх участі по наведеним реакціям 1 і 2, які відображають гомогенну та гетерогенну систему.

Аналіз отриманих результатів моделювання дозволяє зробити деякі висновки. По перше, як і для газифікації вуглецю, першим у процесі конверсії включається газоподібний кисень, термодинамічно вже при 373K його рівноважний парціальний тиск практично дорівнює нулю для обох варіантів систем. Одночасно зростає частка H<sub>2</sub> і CO<sub>2</sub> і знижується H<sub>2</sub>O і CO, ймовірно внаслідок зміщення рівноваги реакції водяного газу. До температури ~ 573K для обох варіантів зростає частка CH<sub>4</sub>, що є скоріше значним зниженням конверсії метану: кисень витрачений, а H<sub>2</sub>O і CO<sub>2</sub> через низькі температури ще не "здіяні" у процес. Подальше підвищення температури (вище 573K) супроводжується зниженням H<sub>2</sub>O і CO<sub>2</sub> і зростанням H<sub>2</sub> і CO, що можна пояснити паровою та вуглецево-кислотою конверсією метану. Практично рівноважний склад газової фази формується при T ~ 1373K, а подальше підвищення температури незначно змінює склад.

УДК 669.094.1:544.478

## ХІМІКО-КАТАЛІТИЧНА ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ВІДНОВЛЕННЯ $\text{Cr}_2\text{O}_3$

О.М. Гришин, к.т.н., доцент, В.О. Петренко, д.т.н., проф., Ю.Д. Хруцька, к.т.н.

Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Механізм інтенсифікації ланки газового відновлення  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (монооксидом вуглецю і воднем) каталітичними добавками солей лужних металів був предметом аналізу багатьох досліджень і докладно розглянуто нами раніше. Він пов'язаний із заміщенням катіонів  $\text{Cr}^{3+}$  одновалентними іонами калію і натрію, що призводить до збагачення поверхні оксиду електронними дірками. Це, в свою чергу, сприяє хемосорбції молекул відновлювальних газів і десорбції газоподібних продуктів -  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ .

Одночасно зазначені процеси заміщення супроводжуються появою нових вакансій в кристалічній решітці оксиду. Зростає концентрація ненасичених валентностей. Ослаблення хімічних зв'язків Cr - O полегшує видалення кисню оксидної фази.

Взаємозалежність окремих ланок відновлення і розвиток циклів перетворень призводить до того, що інтенсифікація однієї ланки сприяє розвитку іншої. Тому прискорення каталітичними добавками реакцій газового відновлення  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  має в певній мірі форсувати газифікацію карбіду хрому діоксином вуглецю і водяним паром. Безпосередній вплив каталізатора на процес газифікації вимагає спеціальних досліджень. Можна лише приблизно висловити наступні міркування. Для карбіду хрому характерна змішана електронно-діркова провідність [1]. Частка діркової провідності зростає в послідовності  $\text{Cr}_3\text{C}_2$  -  $\text{Cr}_7\text{C}_3$  -  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Окислювальна газифікація карбідів хрому повинна супроводжуватися акцепторною хемосорбцією молекул  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ . Розвитку її сприятиме збагачення поверхні кристалів карбіду електронами.

В роботі [2] нами показано, що в температурних умовах проведених експериментів випробувані добавки дисоціюють з переходом лужних металів в газову фазу. Адсорбуючись на поверхні карбідів, атоми калію і натрію можуть віддавати свої валентні електрони твердому відновнику. Хемосорбція молекул  $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$  буде посилюватися, прискорюючи ланки газифікації карбідів і відновлення  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в цілому.

З урахуванням можливості реалізації наведеного механізму слід зазначити, що каталітичний ефект добавок солей лужних металів проявлявся сильніше при використанні в шихті вільного вуглецю [2].

1. Косолапова Т.Я. Карбіди /Т.Я. Косолапова.- М.: Металургія, 1968.- 300с.

2. Дослідження особливостей кінетики і розробка механізму метало- і вуглетермічного відновлення елементів з шлакових систем, які містять хром і кремній, при різних умовах організації процесу з метою отримання метало продукту заданого складу // Звіт по НДР.- Дніпропетровськ, НМетАУ, 2000.-25с.

УДК:669.181.4:66.011

## МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЙ КОМПОНЕНТІВ СИСТЕМИ Fe-Cr-O-C ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ВІДНОВЛЕННЯ ПРИ ОДЕРЖАННІ ЛІГАТУР

О.М. Гришин, к.т.н., доцент, Ю.Д. Хруцька, к.т.н. доцент

Національна металургійна академія України, м. Дніпро

Фізико-хімічні особливості відновлення хроміту заліза були предметом багатьох досліджень, але дотепер немає єдиного представлення про термодинамічні та кінетичні закономірності процесу. В більшій мірі це стосується твердофазного відновлення, метою якого

є отримання губчатих лігатур. Складність термодинамічного аналізу полягає в багатоваріантності процесу. В залежності від умов реалізації процесу, кінцеві продукти відновлення можуть мати різні фазові та хімічні склади.

Хроміт заліза має складну кристалографічну структуру і не меншу складну структуру хімічних зв'язків всередині молекули. В літературі відсутні достовірні дані про закономірності зміни кристалографічних характеристик шпінелі в процесі її відновлення. Це також ускладнює термодинамічний аналіз процесу її відновлення. За результатами наших досліджень, а також даних інших робіт, при спільному відновленні окислів заліза та хрому, або хроміту заліза, можливо первинне видалення кисню, пов'язаного з залізом. Однак, достатня близькість температур початку відновлення створює умови для паралельного відновлення заліза та хрому із складного оксидного з'єднання [1].

При відновленні хроміту заліза чітка стадійність процесу втрачається, що обумовлено складністю хімічних зв'язків у молекулі  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ . Отримані нами термодинамічні дані свідчать про дуже близьку ймовірність отримання в першій стадії, як чистого заліза, так і  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Підтвердженням ймовірності утворення карбіду свідчить і наявність в шихті вільного вуглецю. Відновлювальні властивості  $\text{C}_{\text{тв}}$  і  $\text{Fe}_3\text{C}$  по відношенню до різних оксидів дуже близькі. Виходячи з сказаного можна припустити, що  $\text{Fe}_{\text{мет}}$ , яке утворилося, проходить процес утворення розчину Fe - C, який досягає найвищого значення, перетворюється в карбід  $\text{Fe}_3\text{C}$  за реакцією:  $\text{Fe}_{\text{нас.С}} + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C}$ , яка термодинамічно дозволена вище  $\sim 1063\text{K}$ . Таким чином, на початковій стадії відновлення в аналізованій системі крім вихідних компонентів шихти можуть утворюватися Fe і  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Цементит що утворюється може брати участь у процесі відновлення, через реакцію газифікації, практично рівноправно з вільним вуглецем, але термодинамічно в області підвищених температур більш переважним є  $\text{C}_{\text{тв}}$ . Разом з тим реальний процес не можна звести до декількох окремих реакцій і не враховувати формування та участь у процесі спільних карбідів. На початок відновлення хрому, в системі крім оксидної фази і вуглецю, присутні  $\text{Fe}_{\text{нас.С.і}}$  або  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Надалі процес може розвиватися за трьома гіпотетичними схемам:

а) утворюються атоми хрому, які розчиняються в  $\text{Fe}_{\text{нас.С.}}$ , в результаті формується сумісний металевий розчин;

б) атоми хрому за механізмом заміщення легують цементит, що утворює фазу  $\text{M}_3\text{C}$ ;

в) відновлені атоми хрому взаємодіють з вуглецем, утворюючи наступні карбіди  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6 \rightarrow \text{Cr}_7\text{C}_3 \rightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2$ , які можуть розчинювати атоми заліза (на різних стадіях). Хром є більш сильним карбідоутворюючим елементом і більш вірогідно, що на базі карбіду хрому утворюється карбід  $(\text{Cr, Fe})_n\text{C}_m$ .

Не може бути виключено варіант паралельної реалізації зазначених схем.

Дефіцит вуглецю при відновленні  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$  змінює термодинамічну схему процесу. На певній стадії процесу, коли вуглець повністю витрачається, функції твердого відновника переходять до карбіду  $(\text{Cr, Fe})_3\text{C}_2$ .

### Список літератури

1. Разработка технологических основ энергосберегающего процесса получения хромистых лигатур в тв. состоянии с использованием техногенных отходов промышленных предприятий Украины // Отчет по НИР.- Днепропетровск, ГМетАУ. - 1997.-37с.

УДК 669.162.21.045.2:001.8

## АНАЛІЗ ТЕПЛОВОЇ РОБОТИ МЕТАЛОПРИЙМАЧІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ РІЗНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

**Б.В. Корнілов, к.т.н.; О.Л. Чайка, к.т.н.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

Металоприймач є зоною доменної печі, футерівка якого зазнає механічного та хімічного впливу внаслідок відновлення заліза і формування кінцевого шлаку та високих температур від розплавів, що знаходяться в ньому. Саме стан горну та поду, в значній мірі, визначає тривалість кампанії доменної печі. Тому збільшення стійкості та експлуатаційної надійності горну і поду сучасних доменних печей, є актуальним завданням.

Одним зі способів, що дозволяє збільшити ресурс роботи горна і поду, та дозволяє аналізувати вплив змін в технології доменної плавки на теплову роботу низу печі є використання сучасних АСУ ТП, що мають в своєму складі підсистему контролю розпалу футерівки, утворення гарнісажу горну та поду.

На сьогоднішній день ІЧМ НАНУ займає провідні позиції в Україні щодо реалізації та впровадження на доменних печах систем автоматизованого контролю теплової роботи і розпалу футерівки горна та поду – математичної моделі «Горн», яка встановлена більш ніж на 10 доменних печах.

Виконано аналіз теплової роботи 5 доменних печей України з різною конструкцією металоприймача за інформацією з САК «Горн»:

- 1) ДП №8 ПАТ «Арселор Міттал Кривий Ріг» об'ємом 2700 м<sup>3</sup> – керамічний стакан Saint-Gobain, система охолодження – технічна вода;
- 2) ДП №3 ПрАТ «МК «Азовсталь» об'ємом 1800 м<sup>3</sup> – керамічний стакан Gongyi Anzheng, система охолодження – хімічно очищена вода;
- 3) ДП №3 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м<sup>3</sup> – керамічний стакан Gongyi Anzheng, система охолодження – технічна вода;
- 4) ДП №4 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м<sup>3</sup> – без керамічного стакана, система охолодження – технічна вода;
- 5) ДП №2 ПАТ «Запоріжсталь» об'ємом 1513 м<sup>3</sup> – без керамічного стакана, система охолодження – технічна вода.

В результаті виконаного аналізу встановлено, що узагальнюючим параметром для порівняння теплової роботи металоприймача на доменних печах є питомі теплові втрати на одиницю корисного об'єму печі.

Реалізація безперервного контролю за розпалом горну на доменних печах дозволила оцінити ефект від застосування керамічного стакана з точки зору величини теплових втрат горна. Величина питомих теплових втрат на одиницю об'єму печі на доменних печах з керамічним стаканом (~0,4-0,7 кВт/м<sup>3</sup>) істотно менше, ніж на доменних печах без нього (~0,9-1,1 кВт/м<sup>3</sup>). Така відмінність між питомими тепловими втратами еквівалентна меншій витраті коксу на компенсацію теплових втрат горна та поду на величину 0,5-1,1 кг/т на доменних печах з керамічним стаканом.

УДК 669.162.267:662.87

### **ЯК ПРАВИЛЬНО ВИБИРАТИ ДІАМЕТР ФУРМ ПРИ ВДУВАННЯ ПВП В ДОМЕННУ ПІЧ**

**В.П. Лялюк д.т.н., Д.А. Кассим д.т.н.**

**Учбово-науковий технологічний інститут ДУЕТ, м. Кривий Ріг**

Діаметр повітряних фурм необхідно вибирати виходячи не з зміни кінетичної енергії комбінованого дуття, а з повних енергій потоків комбінованого дуття і горнового газу, які відповідають за зміну розмірів зони горіння і глибини проникнення газового потоку до центру горна. Вибір діаметра фурм з позицій кінетичної енергії призводить до помилок у розподілі газового потоку «знизу».

УДК 669.162.267:662.87

### **ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ З ВДУВАННЯ ПВП І ЗАВАНТАЖЕННЯМ КУСКОВОГО АНТРАЦИТУ**

**В.П. Лялюк д.т.н., Д.А. Кассим д.т.н., Є.В. Чупринов к.т.н.**

**Учбово-науковий технологічний інститут ДУЕТ, м. Кривий Ріг**

Виконано аналіз ефективності технології ПВП на доменній печі об'ємом 5000 м<sup>3</sup> з технологією завантаження кускового антрациту і вдуванням природного газу. Показано, що технологія завантаження кускового антрациту і локальних спеков із залишковим вуглицем і підвищеним вмістом заліза і вдуванням природного газу може конкурувати по витраті кося з кращими результатами вдування ПВП при відсутності економічних і технологічних ризиків.

УДК 669.184:65

### **ВПЛИВ ГІДРОДИНАМІЧНОГО ФАКТОРУ НА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ В ВАННІ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА**

**А.П. Мішалкін к.т.н., Л.В. Камкіна д.т.н., О.І. Дворковий аспірант**

**Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

В дослідженні методами холодного та високотемпературного моделювання визначались вплив параметрів гідродинамічного стану на інтенсивність перемішування ванни, особливості рафінування металевого розплаву при зміні параметрів і способу продування. Встановлено, що вплив гідродинамічного фактору мінімальний на початку продування при підвищенні температури металу ~ до 1400 ° С та на завершальному етапі продування при зниженні концентрації вуглецю ~ до 0,2%.

Показано, що в умовах, коли перемішування в основному визначається кінетичною енергією струменю, доцільно збільшувати інтенсивність дуття киснем. Для способу продувки зверху вона обмежується умовою-  $L_{pz} \leq (0,7 \div 0,8)H_B$ , а для донного дуття -  $L_{pz} \leq (0,6 \div 0,7)H_B$ . Інтенсивність продування, яка забезпечує стабільність гідродинамічного стану ванни конвертера з комбінованою продувкою, високий рівень завершеності основних реакцій її рафінування, обмежується умовами:  $L_{pz} \leq (0,5 \div 0,6)H_B$  для продувки зверху та  $L_{pz} \leq (0,3 \div 0,4)H_B$  для донного дуття.



На основі аналізу результатів високотемпературного моделювання процесу виплавки низько вуглецевої визначено екстремальну залежність між швидкістю циркуляції металу та інтенсивністю десульфурзації.

УДК 669.162.68

### **ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ ДЛЯ УМОВ ЙОГО РАФІНУВАННЯ В КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ**

**А.П. Мішалкін, к.т.н., В.Ю. Камкін, аспірант, Д. О. Петренко, ст. гр. МЕ03-17**

**Національна металургійна академія України м. Дніпро**

Аналіз відомих технологічних рішень, які визначають особливості малошлакових технологій, вимагають уточнення складу переробного чавуну по вмісту в ньому P, S і Si для умов зміни в металошихті конвертерної плавки співвідношень брукхту і чавуну.

З використанням даних термодинамічного прогнозу поведінки елементів рідкого переробного чавуну в умовах його окислювального рафінування в кисневому конвертері та результатів високотемпературного моделювання встановлені найбільш раціональні склади переробного чавуну для його використання при отриманні сталі з різним вмістом в ній вуглецю (0,05%; 0,10%; 0,30% і 0,5%) при зміні змісту часток лому та чавуну.

Теоретично обґрунтовано та підтверджено експериментально, що для умов виробництва сталі з ультранизьким вмістом вуглецю доцільно використовувати чавун, який містить в %: 0,10 ÷ 0,15 C; 0,04 ÷ 0,06 Si та 0,004 ÷ 0,006 S. Основність шлаку при даному складі чавуну доцільно підтримувати на рівні 2,2 ÷ 2,4. Виконання цих умов необхідно для забезпечення виконання шлаком спектра його функціонального призначення: перевід в шлак фосфору і сірки, ефективний захист поверхні металу від окислення і від надмірного його охолодження.

Одержано кореляційні залежності кількості шлаку від складу і частки чавуну в металевій шихті киснево-конвертерної плавки.

УДК 669.184

### **ДОСЛІДЖЕННЯ НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ МОЖЛИВОСТІ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕЄСТРАЦІЇ ЯСКРАВІСТІ ГАЗОВОГО ФАКЕЛУ, У ТОМУ ЧИСЛІ В УМОВАХ ЗАПИЛЕНОСТІ**

**Л. С. Молчанов, к.т.н., Т.С. Голуб, к.т.н., С.І. Семикін**

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро**

При управлінні киснево-конвертерним процесом за рахунок визначення вмісту вуглецю в ванні основним інструментом оператора-дистрибутора є аналіз газів, що відходять і візуальна оцінка яскравості світіння полум'я над горловиною конвертера. Зазначена задача є досить складною, і значну допомогу при її вирішенні здійснювало би визначення ступеня близькості системи до критичного стану при динамічній оцінці оператором температурного ходу плавки по «візуальним показникам» з урахуванням поведінки конвертера при різній інтенсивності продувки, особливо в період відпрацювання режимів роботи нових конструкцій продувних пристроїв. У якості зазначеного показника може слугувати яскравість світіння факелу над горловиною конвертера.

Конвертерний газ відіграє роль «палива» при формуванні факела над горловиною конвертера і являє собою складну гетерогенну систему, яка складається з газоподібної (монооксид і діоксид вуглецю, кисень, азот та інші гази) і дисперсної (пил та краплі металу і шлаку) фаз. Випромінювальні характеристики факела визначаються його складом та способом його спалювання. Оптично невидимий факел під час спалювання газу утворюється при повному

згорянні палива і складається він з суміші трьохатомних газів, азоту і кисню при надлишку повітря. Випромінювальні характеристики такого факела визначаються вмістом у ньому водяної пари  $H_2O$  і вуглекислого газу  $CO_2$ . Факел, що світиться під час спалювання газу, складається з трьохатомних продуктів реакції горіння і розпечених сажистих часток, які викликають світлимість факелу. Відповідно до наведеного вище у роботі увагу було зосереджено на дослідженні можливості та особливостей реєстрації випромінювання палаючого полум'я вуглецевмісних газів та інформативності цього показника при вивченні запиленості середовища навколо факелу твердими компонентами різної фракції. Для проведення досліджень була виготовлена фізична модель, що дозволяє імітувати процес горіння газів, які відходять, в умовах запиленого середовища. Для реєстрації показників яскравості факелу (інфрачервоного, денного та ультра фіолетового спектру випромінювання) було використано фотодіоди з можливістю реєстрації світіння відповідного спектру. У якості порошоків для імітації запиленості факелу використовували різні речовини дрібної (100-200 мкм) фракції: графіт, сажу, ПЗВ-200, а також оксиди заліза (II) та (III), кальцію, кремнію, магнію.

Виконане фізичне моделювання впливу твердих суспендованих часток, що подавалися безпосередньо у факел, на показники яскравості палаючого факелу за трьома діапазонами спектру випромінювання показало:

- при появі у палаючому факелі твердих дрібних (фракція порядку 100-200 мкм) часток оксидів кремнію, кальцію, магнію, заліза, графіту чи сажі його яскравість підвищується;
- на рівень ультрафіолетового діапазону випромінювання наявність твердих часток дослідженого складу та фракції практично не чинило впливу (деяке підвищення рівня встановлене при згорянні часток заліза за рахунок значного підвищення температури факелу);
- щодо рівня видимого та інфрачервоного спектру присутність дрібних часток у середовищі факелу через неповне згорання газової суміші з формуванням сажистих часток сприяє підвищенню показників та збільшенню видимої частини факелу (здебільшого жовтогарячого кольору);
- підвищення яскравості факелу при прямому потраплянні у нього твердих часток, що не горять, відбивається на зниженні теплових показників факелу, а при потраплянні у факел часток, що горять – значному підвищенню рівня теплоти, що створює факел.

УДК 669.162.2:669.788:001.8

## **АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ ВОДНЮ У ДОМЕННОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

**Москалина А.О., к.т.н., Чайка О.Л., к.т.н., Корнілов Б.В., к.т.н., Лебідь В.В., к.т.н.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

Актуальність застосування водню визначається необхідністю зменшення викидів  $CO_2$  на металургійних підприємствах для дотримання цілей щодо викидів парникових газів, встановлених в угодах 25-ої Конференції сторін Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй зі зміни клімату в 2019 році у Мадриді.

Лідуючі позиції по впровадженню технологій, спрямованих на зменшення викидів  $CO_2$  у доменному виробництві займають країни ЄС, Китаю та Японії. У цих країнах на державному рівні здійснюється підтримка інноваційних технологій, спрямованих на скорочення викидів  $CO_2$ . Наприклад, в Німеччині (Дуйсбург) при державній підтримці будується доменна піч, яка буде працювати з вдуванням у горн доменної печі водню замість пиловугільного палива (ПВП). На Півночі Швеції, в регіоні Боден, планують побудувати завод з виробництва водню, який буде використовуватися при виробництві низьковуглеводної металургійної продукції. Загальний обсяг фінансування першої фази проекту становить приблизно 2,5 мільярда євро. Китайська асоціація чавуну і сталі (CISA) найближчим часом представить ряд програм щодо скорочення викидів  $CO_2$  в сталеливарному секторі в рамках зобов'язань країни досягти кліматичної нейтральності до 2060 року. Nippon Steel має намір направити 4,6 мільярда євро на

впровадження інновацій по декарбонізації виробництва сталі, в тому числі за рахунок застосування водню.

В ІЧМ НАНУ розроблено математичну модель повного енергетичного балансу доменної плавки, на основі якої виконано оцінку впливу технології вдування в горн водню на теплоенергетичні показники роботи доменної печі. Встановлено, що лімітуючим технологічним фактором вдування водневмісних добавок при збереженні витрат ПВП на рівні 160÷180 кг/т є зменшення теоретичної температури. Для її підтримки на рівні не нижче 2000°C може бути необхідним збільшення концентрації кисню в дутті до 35%. Зменшувати витрати ПВП, як самого, на сьогоднішній день, доступного та дешевого палива, може бути недоцільним, так як це призведе до збільшення витрат коксу та собівартості чавуну.

Вдування в горн доменної печі водню в кількості до 300 м<sup>3</sup>/т чавуну дозволить скоротити викиди CO<sub>2</sub> до 20% за рахунок зменшення кількості сумарного вуглецю в печі (кокс, паливні добавки) та зменшити витрати коксу до 20% за рахунок збільшення частки непрямого відновлення заліза.

УДК 669.184

### **ДОСЛІДЖЕННЯ НА ФІЗИЧНІЙ МОДЕЛІ КИСНЕВОГО КОНВЕРТЕРА ОСОБЛИВОСТЕЙ РУЙНУВАННЯ ФУТЕРІВКИ У ДОННІЙ ЧАСТИНІ ПРИ РІЗНИХ УМОВАХ ВЕРХНЬОЇ ПРОДУВКИ**

**О.М. Муель Еконго<sup>2</sup>, Є. В. Синегін<sup>2</sup>, к.т.н. доц., Л. С. Молчанов<sup>1</sup>, к.т.н.**

**<sup>1</sup>-Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро;**

**<sup>2</sup>-Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

Технологічні та економічні показники роботи кисневого конвертера залежать як від зовнішніх чинників (стан та показники шихтових матеріалів, встановлені технологічні особливості перебігу продувки) так і від технологічних та якісних показників самого агрегату, що визначаються, перш за все, стійкістю вогнетривкої футерівки, що вкриває його робочу поверхню. Умови служби футеровки кисневого конвертера можна охарактеризувати як досить екстремальні: дуже високі температури перебігу зазначених процесів, агресивні по відношенню до матеріалу футерівки середовища, значний механічний (фізичний) вплив. Відомо, що знос днища має лінійний характер з найбільшою глибиною у підфурменій зоні й залежить, в основному, від гідродинамічних особливостей взаємодії продувних струменів з рідкою ванною. Гідродинаміка конвертерної ванни, вочевидь, має залежати від її діаметру, та від конструктивних параметрів наконечника фурми. У роботі було проведено дослідження особливостей впливу газо-рідинних струменів, що витікають з наконечників різної конструкції, на руйнування донної частини футерівки при продувці через верхню фурму на моделі ванни конвертера в масштабі 1:35,5, яка в точності імітує профіль футеровки кисневого конвертера ємністю 250 т ПАТ «ДМК». Для вимірювання глибини та ширини зносу були виготовлені дерев'яні маячки з кольоровими мітками розташованими з інтервалом 5 мм по довжині, які було розміщено на відстані 20 мм один від одного по всій поверхні футерівки. Для продувки було досліджено конструкції наконечників з різною кількістю сопел (1,3,5) і кутом їх нахилу до осі фурми (4, 9, 15 град.).

За результатами проведеної роботи встановлено, що глибина зносу футерівки кисневого конвертера в області днища (центр і ділянки навколо нього), збільшується зі зменшенням кількості сопел і кута нахилу сопел. Це пов'язано зі збільшенням глибини проникнення газових струменів в рідину, що призводить до підвищення швидкості циркуляції рідини в зоні днища і, як наслідок, більш активного його руйнування.

За результатами досліджень було розроблено прогнозну математичну модель зносу футерівки в донній частині агрегату в залежності від параметрів продувних пристроїв, що, судячи з величини коефіцієнта апроксимації і критерію Фішера, показала добру адекватність:

$$h = 39,7 - 0,15n\alpha - 0,49n^2, \quad (1)$$

де  $h$  – глибина зносу, мм;  $n$  – кількість сопел, шт.;  $\alpha$  – кут нахилу сопел.

Аналіз модельних розрахунків показав, що найважливіший вплив на величину зносу футерівки має кількість сопел у наконечнику, проте їх збільшення потребує збільшення кута нахилу відносно вісі фурми задля уникнення злиття струменів, що призводить до зниження глибини проникнення їх у рідку ванну й, відповідно, погіршення умов перемішування. У вказаному випадку відбувається переокислення ванни через поверхневий обдув з надмірним спінюванням шлаку, а у найгірших умовах – розмивання футерівки циліндричної частини. Виходячи з цього, найбільш раціональним з точки зору забезпечення необхідних гідродинамічних показників перемішування рідкої ванни та низького впливу на донну частину рекомендується використання п'яти – шести соплові наконечники з кутом нахилу 15 град.

УДК 669.02/09:669.162.262.001.5

## ПРОГНОЗУВАННЯ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ПЕРВИННИХ ШЛАКОВИХ РОЗПЛАВІВ У РІЗНИХ ЗОНАХ ДОМЕННОЇ ПЕЧІ

**І.Г. Муравйова, д.т.н., М. Г. Іванча, В.І. Вишняков, А.І. Белькова к.т.н.,  
О.С. Нестеров, к.т.н., Л.И. Гармаш, к т н.**

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, Дніпро**

Важливою особливістю експертної системи вибору оптимального складу багатокомпонентної доменної шихти, яка розроблюється, є її можливість прогнозування властивостей первинних шлакових розплавів у дискретних зонах печі. Можливість позонного аналізу високотемпературних перетворень залізовмісних компонентів шихти забезпечена використанням *комплексної моделі розподілу компонентів шихти по радіусу колошника*.

З метою спрощення процедури моделювання на основі аналізу численних розрахунків отримані аналітичні вирази розподілу компонентів шихти по радіусу колошника печі – агломерату, окатишів та домішок.

«*Модель процесу*», що включає комплекс математичних моделей, реалізує розроблену в Інституті чорної металургії НАНУ концепцію моделювання процесів спрямованого формування розплавів.

З використанням цього аналітичного апарату виконані прогнозні дослідження властивостей первинного (у кожній зоні) та кінцевого шлакового розплавів, результати яких з урахуванням технологічних обмежень дозволять оптимізувати склад багатокомпонентної доменної шихти.

Для кожної порції шихтових матеріалів у 10 зонах колошника печі та трьох варіантів уставок вивантаження окатишів на підставі витрат компонентів та їх хімічного складу розраховуються наступні групи показників:

1. Хімічний склад та основні характеристики шихти, яка завантажується, без золи коксу та з золю коксу, параметри структури шлакової зв'язки шихти.
2. Температури агрегатного перетворення шихтових матеріалів (температури розм'якшення та плавлення).
3. Кількість, хімічний склад, фізико-хімічні критерії структури та властивості первинного шлаку (вміст у розплаві, температури початку фільтрації та максимальної фільтрації через коксову насадку, в'язкість, поверхневий натяг, температура початку плавлення).

Аналіз розрахункових показників первинних шлакових розплавів у різних зонах печі з урахуванням особливостей розподілу компонентів шихти по радіусу колошника печі та їх зіставлення з технологічними обмеженнями показав;

1. Розраховані по подачі, яка завантажується, показники високотемпературних властивостей залізородних матеріалів та первинних розплавів, що утворюються, не перевищують допустимих значень науково обґрунтованих технологічних вимог, вироблених в результаті численних досліджень з позиції забезпечення нормальних газодинамічного та шлакового режимів, а також забезпечення ефективності доменної плавки.

2. Розраховані в зонах печі показники високотемпературних властивостей залізородних матеріалів та первинних шлаків близькі до значень, які постулюються технологічними обмеженнями та забезпечують раціональний температурний та шлаковий режими у верхніх зонах доменної печі.

3. Відхилення будь-якого показника високотемпературних властивостей шихтових матеріалів від регламентованого технологічними обмеженнями значення свідчить про необхідність внесення змін до складу доменної шихти.

УДК 669.02/09: 669.162.262.001.8

## **НОВІ ПОКАЗНИКИ ТЕМПЕРАТУРНО-ДУТТЄВОГО РЕЖИМУ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ ПРИ РІШЕННІ ЗАДАЧ ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ КІНЦЕВИХ ПРОДУКТІВ ПЛАВКИ**

**І.Г. Муравйова, д.т.н., В.Р. Щербачов, А.І. Белькова, к.т.н., Н.Є. Ходотова,  
К.П. Єрмоліна**

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, Дніпро**

Представлені результати досліджень використання методики прогнозування коефіцієнтів розподілу елементів шихти між продуктами доменної плавки на основі інтегральних параметрів шихти та температурно-дуттєвого режимів для розрахунку хімічного складу чавуну у сучасних умовах роботи доменних печей України. Дослідження виконані для двох різних умов роботи доменних печей, технологія виплавки чавуну на одній з них передбачала використання пиловугільного палива (ПВП), а на другій – його спільне використання з природним газом.

Розроблено нові показники оцінки тепло-газодинамічного режиму, які можуть бути використані при рішенні задач прогнозування складу та властивостей кінцевих продуктів плавки у сучасних умовах, які передбачають використання пиловугільного палива.

Використовуючи принцип редукції - «від складного – до простого», на першому етапі створення комплексного показника теплового стану розроблено алгоритм розрахунку тепла у нижній зоні доменної печі, який засновано на тепловому балансі. Для визначення загального тепла у нижній зоні доменної печі, яке характеризується показником сумарної кількості тепла  $Q_T$ , використана методика О. М. Рамма, згідно з якою джерелами теплової енергії є тепло, яке надійшло в зону горіння з паливними елементами, а також тепло, яке виділилося в результаті екзотермічних реакцій в зоні відновлення. Аналіз залежностей коефіцієнтів розподілу кремнію та сірки між чавуном та шлаком з показником  $Q_T$  показав задовільну ступінь їх кореляції, що дозволяє використовувати показник сумарної кількості тепла у нижній зоні печі  $Q_T$  для прогнозування складу продуктів плавки..

В разі, коли використання балансового алгоритму розрахунку тепла викликає ускладнення у зв'язку з великою кількістю операцій, зокрема, для оперативної оцінки та прогнозу складу продуктів плавки, запропоновано використовувати узагальнений показник теплового та дуттєвого режимів  $K_T$ , розроблений на основі запропонованої раніше методики складання комплексних показників оцінки процесів плавки.

Як показали результати досліджень, між показником сумарного тепла  $Q_T$  та інтегральним показником тепло-газодуттєвого режиму  $K_T$  існує задовільний зв'язок, наявність якого дає можливість використовувати останній у якості модельного параметра при прогнозуванні коефіцієнтів розподілу елементів шихти між чавуном і шлаком, що забезпечує оперативний прогноз хімічного складу чавуну та шлаку у задачі вибору оптимального складу шихти.

Виконаний аналіз показників доменної плавки та розрахунково-аналітична оцінка властивостей кінцевих шлакових розплавів для різних технологічних умов роботи доменних печей підтвердили правомочність використання запропонованих інтегральних показників шихти та оцінки тепло-газодуттєвого режиму плавки в розроблюваної Експертної системі вибору оптимального складу багатокomпонентної доменної шихти.

УДК: 669.168: 669.26.0018

## **БАЗА ДАНИХ «ФЕРРОСПЛАВИ», РОЗВИТОК І ПРАКТИЧНЕ ВИКОРИСТАННЯ**

**А.П. Петров, н.с., Л.А.Головко, н.с., О.В.Кукса, н.с., Ю.М.Лихачев н.с.**

**Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м.Дніпро**

Сучасні інформаційні технології – це ефективний засіб вирішення багатопланових завдань щодо поліпшення якості металопродукції. У ІЧМ НАН України, в відділі фізико-хімічних проблем, розвивається методологія створення і практичного використання інформаційно-аналітичних систем (ІС), на основі баз даних.

Співробітниками ВФХП сформована база, що включає інформацію про виробництво, хімічний склад і вимоги, що пред'являються до феросплавів різних груп [1]. Джерелом інформації є літературні дані вітчизняних і зарубіжних авторів. Систематизовані дані про 284 складах феросплавів. В базу включені відомості про комплекс фізико-хімічних, фізичних і теплофізичних властивостей феросплавів широкого сортаменту (ферохрому, феросиліцію, феромарганцю, ферованадію, феротитану, фероніобію, феронікилю, фероцирконію, феромолібдену, силікокальцію, силікомарганцю, феросилікоцирконію і ряду інших).

Інформація про найважливіші теплофізичні, фізико-хімічні і фізико-механічні властивості систематизована і прив'язана до конкретного хімічного складу даної марки феросплавів широкого сортаменту. В останній час база значно поповнена інформацією про властивості комплексних феросплавів нового типу. Ці дані (таблиці) можуть бути використані в якості вихідних параметрів при математичному, фізико-хімічному та фізичному методах моделювання процесів, що протікають при взаємодії феросплавів з рідкою сталлю. Пошук документів в базі здійснюється за лексичними одиницями (словами, числами, датами) або фразами, що містяться в текстах документів. Для фактографічної інформації передбачено перегляд у вигляді таблиць.

Систематизація різнотипної інформації в базах забезпечує:

- знаходження інформації в документально-фактографічних базах даних зі збереженням оригінальності їх початкового вигляду;
- використання теоретичних і емпіричних моделей для прогнозування властивостей по вибірках з баз;
- використання різнопланового графічного представлення інформації для інтерактивної експертної оцінки зашумлених областей даних.

### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Базы данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали/ Тогобицкая Д.Н., Пиптюк В.П., **Петров А.Ф.**, Греков С.В., Снигура И.Р., Лихачев Ю.М., Головко Л.А.// Сб. научн. тр. ИЧМ «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии». – Днепр. 2017, №31 С.150-165.

УДК 669.184

## **РЕЗУЛЬТАТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕРНІЗОВАНИХ НАКОНЕЧНИКІВ КИСНЕВИХ ФУРМ**

**А.А. Похвалітій, к.т.н., Є.М. Сігарьов, д.т.н., В.О. Горденко**

**Дніпровський державний технічний університет, г. Кам'янське**

При розробці дослідних наконечників насамперед враховувалися коливання тиску кисню перед соплом. Встановлено, що фурми з дослідними наконечниками, при наявному в цеху тиску, надійно працюють в діапазоні витрат кисню 650-950 м<sup>3</sup>/хв і дозволяють збільшувати витрату кисню на початку продувки до 1000 м<sup>3</sup>/хв і більше, при необхідності. Підтверджено, що застосування наконечників з кутом нахилу сопел 15 град. замість 17,5 град. додатково дозволяє підвищити ефективність операції попереднього підігріву брухту перед заливанням чавуну при зменшенні ризику скорочення строку експлуатації периклазовуглецевої футерівки агрегату. Крім того, зменшення кута нахилу сопел дозволяє підвищити ефективність застосування кисневої фурми у випадку використання її для раздувки кінцевого шлаку на футерівку.

За результатами аналізу даних дослідно-промислових кампаній встановлено, що дослідні плавки з 5-ти сопловим наконечником характеризуються: підвищенням на 0,105% середнім вмістом [Si]<sub>чав</sub> при більш низькій концентрації марганцю (- 0,05%) і фосфору (- 0,005%) у порівнянні зі штатними плавками; підвищеною питомою витратою брухту в металошихті (+3,85 т) при відповідній економії передільного чавуну (- 0,9% чавуну); очікуваною незначною перевитратою кисню на попередній підігрів брухту (+2,7%) і зменшенням витрати кисню на продувку (-1,7%); показник дефосфорації розплаву збільшився на 2,35%. За результатами даної дослідної кампанії отримано зниження окисленості кінцевого шлаку на 1,7% і питомої витрати металошихти на сталеву заготовку на 0,29 кг/т. Дослідні плавки другої кампанії, проведені з використанням для продувки ванни 5-ти соплового наконечника характеризуються наступними показниками: при приблизно рівному зі штатними середнім вмістом [Si]<sub>чав</sub> витрати вапна на плавку підвищено на 1,32 кг/т, що обумовлене підвищеною витратою передільного чавуну (+ 1,7%) у порівнянні зі штатними плавками; ступінь дефосфорації залізобуглецевого розплаву по закінченню продувки в дослідних плавках склала 76,52% у порівнянні з 76,61% на штатних плавках (- 0,009%) при одночасному зниженні окисленості шлаку на 1,96%; питома витрата металошихти на сталеву заготовку знижена на 0,38 кг/т.

На дослідних плавках з використанням 6-ти соплового наконечника при приблизно рівному вмісті кремнію й фосфору в передільному чавуні у зв'язку зі зниженням частки останнього в металошихті (у середньому - 0,83 т/пл.) досягнуто скорочення питомої витрати вапна (- 1,81 кг/т) і кисню на продувку ванни (- 264 м<sup>3</sup>/плавку). При рівній температурі ванни по закінченню продувки вміст вуглецю в розплаві було вище на 0,012% у порівнянні зі штатними плавками, а окисленість шлаку – менше на 1,22% відповідно. Зниження основності (- 0,24 од.) і окисленості шлаку призвело до зменшення ступеня дефосфорації розплаву на 1,14 %. Скорочення питомої витрати металошихти на сталеву заготовку при використанні 6-ти соплового наконечника в період дослідно-промислової кампанії склало 0,26 кг/т.

УДК 669.184

## **ПІДВИЩЕННЯ «ЖОРСТКОСТІ» ДУТТЯ ДЛЯ ПІДІГРІВУ МЕТАЛОБРУХТУ В КОНВЕРТЕРІ**

**А.А. Похвалітій к.т.н., Є.М. Сігарьов д.т.н., П.А. Якунін**

**Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське**

З метою визначення раціональної конструкції і параметрів наконечника кисневої фурми, придатної для технології ведення плавки з підвищеною кількістю попередньо підігрітого

металобрухту у металошихті 250-т конвертерів ПАТ «ДМК», виконані дослідження та відповідні розрахунки основних параметрів 5-ти і 6-ти соплових наконечників зі змінним, у порівнянні зі штатними наконечниками, кутом нахилу сопел Лаваля.

За прийнятою у цеху технологією ведення плавки попередній підігрів металобрухту здійснюють безпосередньо у конвертері за рахунок спалювання кускового вугілля киснем, що подають крізь сопла, розташовані під кутом  $17^{\circ}$ , наконечника кисневої фурми з витратою 600-650  $\text{нм}^3/\text{хв}$ . на протязі 4-5 хв.

Відомо, що для підвищення ступеня використання вугілля на підігрів металобрухту доцільно реалізувати більш «жорсткий» режим дуття та розосереджену у часі присадку вугілля. Не менш важливим питанням є попередження прискороного локального зносу футерівки конвертера під впливом високотемпературних факелів, що утворюються при спалюванні вугілля, за рахунок віддалення факелу від робочої поверхні вогнетривів.

З врахуванням наведених вище умов запропонована конструкція наконечників фурм з кутом нахилу сопел у  $15^{\circ}$ . Для прогнозування впливу зміни положення над ванною запропонованих наконечників на діаметр реакційної зони, у порівнянні зі штатними, розрахували, у першому наближенні (без врахування режимів витікання струменів), умовні геометричні параметри зони контакту кисневих струменів з поверхнею ванни.

За результатами дослідно-промислового випробування запропонованої конструкції 5-ти соплового наконечника встановлено, що останні надійно працюють при витратах кисню 650-1000  $\text{нм}^3/\text{хв}$ .

Забезпечено підвищення ефективності використання вугілля на попередній підігрів зі зменшенням інтенсивності зносу футерівки конвертера та підвищення ефективності роздування шлакової ванни на футерівку з метою нанесення шлакового гарнісажу.

УДК 669.18:621.746.32

## **АНАЛІЗ УТВОРЕННЯ ЛОКАЛЬНО ПЕРЕГРІТИХ ЗОН ГРАФІТОВАНОГО ПОРОЖНИСТОГО ЕЛЕКТРОДА ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ**

**В.О. Рубан, аспірант, О.М. Стоянов, к.т.н., Є.В. Синегін к.т.н.**

**Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

На сьогодні однією з основних умов розвитку сталеплавильного виробництва для отримання якісних сталей є вдосконалення технологій позапічної обробки сталі. Основними операціями обробки сталі на установці «ківш-піч» є її рафінування та легування. Внаслідок проведення низки операцій, які призводять до зниження температури сталі, слід її підігрівати. Відомо, що джерелами тепла, які можуть використовуватися для нагрівання сталі, є електрична дуга постійного або змінного струму, хімічний нагрів та індукційний нагрів. Найбільш розповсюдженою є технологія нагріву сталі електричною дугою змінного струму на УКП.

У зв'язку з тим, що руйнування електродів відбувається переважно за рахунок високотемпературних навантажень [1], проведено комп'ютерне моделювання по визначенню характеристик температурного поля порожнистого електрода, каналом якого здійснюється подача газу для зменшення фізичного і хімічного впливу в різні періоди обробки сталі на установці «ківш-піч» [2].

Отримано дані розподілу температур по об'єму графітованого порожнистого електрода (ГПЕ). Встановлено, що в періодах роботи електрода під електричним навантаженням максимальна температура здебільшого зосереджена на нижньому торці. Це пояснюється накопиченням теплоти від електричної дуги. В періоди нагріву спостерігається істотний градієнт температур по довжині електрода, який виникає тільки на проміжку 0,35 м від нижнього торця ГПЕ, та складає  $8286 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{м}$ .

Визначено принцип утворення локально перегрітої зони в періоди простою (без навантаження) ГПЕ, який полягає в швидкому охолодженні нижнього торця та перенесенні і



розподілі теплоти від останнього об'ємом ГПЕ. Встановлено, що в періоди охолодження електрода локально перегріті зони формуються на відстані 0,03-0,08 м від нижнього торця ГПЕ. За своєю формою вони нагадують сплющений уздовж осі тор. В горизонтальній площі від центру тора розрахунковий градієнт температур склав до внутрішньої поверхні 379 °С/м; до зовнішньої поверхні 3613 °С/м; і вертикальній площині до торця електрода 1469 °С/м.

Встановлено, що подача нейтрального газу через ГПЕ з витратами 0,05 м<sup>3</sup>/хв. зміщує високотемпературну зону до периферії на 3,5–4,2 мм, а також зменшує її висоту на 1,0–1,2 мм.

### Література

1. Кудрин В.А. Внепечная обработка чугуна и стали: Учебник / В.А. Кудрин. – Москва: Металлургия, 1992. – 336 с.
2. Determining changes in the temperature field of a graphitized hollow electrode during metal processing periods in ladle-furnace / V. Ruban, O. Stoianov, K. Niziaiev, Y. Synehin// Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2021. – №2. – P. 109 – 115. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.230002>

УДК: 681.3:669.02/09:669.1.054.82.

## РОЗВИТОК ТА ПОПОВНЕННЯ БАЗ ДАНИХ «ШЛАК» ТА «ШУС<sup>1</sup>» ПІДСИСТЕМОЮ ЦИФРОВОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПОТРІЙНИХ ДІАГРАМ

Д. О. Степаненко к.т.н., Д. М. Тогобицька д.т.н., проф., С. С. Черський інж. І-ї кат.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро

Фундаментальна та прикладна наука про оксидні системи накопичила значну кількість експериментальних даних, які характеризують їх фізико-хімічні та технологічні властивості в різних металургійних процесах. На сьогоднішній день обчислювальна техніка має засоби, які дозволяють їй не лише раціонально зберігати такі дані, але і зручно оперувати ними - це бази даних (БД).

Бази даних, які містять результати експериментальних досліджень властивостей металургійних розплавів, в тому числі шлаків і різних оксидних систем, слугують інформаційною основою для теоретичної і прикладної металургії при розробці шляхів вдосконалення існуючих і принципово нових технологій отримання металопродукції необхідної якості при зниженні витрат на її виробництво і поліпшення екологічних показників.

Створені в Інституті чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України (ІЧМ НАНУ) бази експериментальних фізико-хімічних даних про властивості шлакових розплавів «Шлак» і «ШУС» в рамках банку даних «Металургія» орієнтовані на задоволення інформаційних потреб теоретичної і прикладної металургії і протягом більше 20 років знаходяться в стадії постійної експлуатації і активного поповнення новими експериментальними даними [1].

У зв'язку з необхідністю забезпечення наукових досліджень даними про властивості шлакових розплавів різного технологічного призначення, особливо спеціальних шлакоутворюючих сумішей, інформаційно-пошукова система баз поповнена алгоритмічним та програмним забезпеченням, яке дозволяє здійснювати цифрову ідентифікацію діаграм, про фазовий стан або властивості, трьох- і чотирьох компонентних діаграм оксидних систем. різних за хімічним складом.

Принцип роботи алгоритмічного та програмного забезпечення полягає у завантаженні відповідної, трьох- або чотирьох компонентної потрійної діаграми і знаходженні у полі діаграми необхідної точки с даними про фазовий склад або певною властивістю (температура ліквідус, в'язкість, електропровідність, поверхневий натяг та ін.) в результаті чого виводиться інформація про хімічний склад системи. Програма здатна вирішувати і зворотні задачі.

<sup>1</sup> ШУС – шлакоутворюючі суміші

Завдяки розробленому алгоритмічному та програмному забезпеченню, база «ШУС» була поповнена інформацією про властивості та фазову зміну складу систем:  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ,  $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ ,  $\text{SiO}_2\text{-MgO-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO-CaO-Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$  в процесі їх кристалізації за різними даними, які є базовими для розробки нових складів ШУС, що забезпечують підвищення ефективності процесів рафінування чавуну та сталі.

Паралельно з накопиченням інформаційного фонду баз даних «Шлак» та «ШУС» підтримується системний сервіс обробки даних для формування коректних вибірок, оцінки ступеня вивченості оксидної системи на основі широкого використання сервісу проєкціювання даних [2].

Література

1. Приходько Э. В. Прогнозирование физико-химических свойств оксидных систем / Приходько Э. В., Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Степаненко Д.А. – Днепропетровск: Пороги. – 2013. – 339 с.
2. Тогобицкая Д. Н. Системное, прикладное и проблемное программное обеспечение банка данных «Металлургия» / Д.Н. Тогобицкая, Р.Б. Григянец // Известия АН СССР. Metallurgy. Metally. – 1991. – №4. – С. 210-215.

УДК 669.18

## ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИКОРИСТАННЯ ДОЦЕНТРОВОЇ СИЛИ ДЛЯ РАФІНУВАННЯ СТАЛІ ВІД НВ ПРИ БЕЗПЕРЕРВНОМУ РОЗЛИВАННІ

**С.В. Суховецький, аспірант, Є.В. Синегін, к.т.н., Л.С. Молчанов, к.т.н.,  
С.В. Журавльова, к.т.н.**

**Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

Одним з параметрів, що визначають якість сталі, є забрудненість її неметалевими включеннями (НВ). Потрапляння та утворення НВ у сталі відбувається починаючи з виплавки сталі у сталеплавильному агрегаті і триває впродовж позапічної обробки, розливання, кристалізації і охолодження сталі. Саме тому важливо не обмежувати рафінування сталі від НВ сталерозливним ковшем, а продовжувати його й в процесі безперервного розливання сталі.

Наразі найрозповсюдженішими методами попередження забруднення сталі НВ є раціональне розкислення і легування сталі. Для рафінування сталі від НВ використовуються продувка інертним газом, модифікування НВ, електромагнітне перемішування (ЕМП) сталі та керамічні фільтри. Більшість методів вимагають використання вартісних додаткових витратних матеріалів або обладнання. На їх тлі видалення НВ за допомогою доцентрової сили має суттєві переваги. Огляду методів її створення й присвячено цей огляд.

Найбільш очевидним методом утворення вихрового руху та доцентрової сили, що діє на НВ у сталі, є електромагнітне перемішування сталі. Здійснення ЕМП можливе у сталерозливному ковші, промковші і кристалізаторі МБЛЗ. Однак можливі і альтернативні методи утворення вихрового руху металу у промковші і кристалізаторі МБЛЗ, які полягають у використанні потенційної енергії падаючого струменя.

Авторами було запропоновано один з можливих методів перетворення потенційної енергії струменя сталі, що витікає зі сталерозливного ковша у розливну камеру промковша, у кінетичну енергію обертального руху та шляхом фізичного моделювання оцінено траєкторію впливання НВ у вихорі рідкої сталі. За результатами моделювання траєкторія впливання НВ залежно від параметрів руху є гвинтовою лінією, утвореною на поверхні звичайного або гіперболічного конуса.

УДК 669.162.16

## **МОЖЛИВОСТІ НОРМАЛІЗАЦІЇ ГАЗОДИНАМІЧНИХ РЕЖИМУ ПЛАВКИ ПРИ ВДУВАННІ В ДОМЕННУ ПІЧ ПИЛОВУГІЛЬНОГО ПАЛИВА**

**А.К. Тараканов<sup>1</sup>, д.т.н., В.П. Лялюк<sup>2</sup>, д.т.н., Д.А. Кассим<sup>2</sup>, д.т.н.**

<sup>1</sup> **Національна металургійна академія України, м. Дніпро;**

<sup>2</sup> **Учбово-науковий технологічний інститут ДУЕТ, м. Кривий Ріг**

Застосований на доменній печі №9 режим завантаження далекий від оптимального. Він не забезпечує формування вузької коксової «віддушини» і створює концентрований рудний гребінь на середині радіуса колошника, що знижує ступінь використання газу в печі і збільшує питому витрату коксу. Оптимізація розподілу шихтових матеріалів на колошнику вимагає коригування не тільки циклу завантаження, але і встановлених кутів нахилу лотка, особливо на його перших позиціях.

УДК 669.162.2:669.162.275.2.004.12

## **ОЦІНКА ШЛАКОВОГО РЕЖИМУ В СУЧАСНИХ УМОВАХ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ В СИСТЕМІ «ШЛАК»**

**Д.М. Тогобицька, д.т.н., А.І. Белькова, к.т.н., Д.О. Степаненко, к.т.н., Н.О. Цюпа, к.т.н.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

Використання в сучасних умовах доменної плавки пиловугільного палива (ПВП) та вторинних ресурсів, що містять шкідливі сполуки і лужні метали, зумовило розвиток модельного комплексу експертної системи контролю та управління шлаковим режимом доменної плавки [1], функціонування якої в складі АСУТП ДП дозволяє ефективно і на сучасному рівні вирішувати завдання оптимізації шлакового режиму і якості чавуну в змінних умовах роботи доменних печей.

Аналіз сучасного шлакового режиму плавки роботи доменних печей України з різними шихтовими і технологічними умовами показав його зміни, що характеризується зниженням основності шлаку і підвищенням вмісту лужних оксидів, що потребувало відповідного корегування системи критеріїв експертної оцінки.

З використанням модельного комплексу системи «Шлак» виконано розрахунково-аналітичні дослідження шлакового режиму для сучасних умов роботи двох печей. Доменна піч ДП-А працювала з використанням ПВП (117 кг/т чавуну) та природного газу (53,4 м<sup>3</sup>/т), а у ДП-Б вдували тільки пиловугільне паливо (150 кг/т). Показники продуктів плавки для двох печей мали істотні відмінності по хімічному складу чавуну: вміст кремнію, сірки та марганцю дорівнював для ДП-А: [Si]=0,48%, [S]=0,037% і [Mn]=0,25% та для ДП-Б: [Si]=0,78%, [S]=0,025% і [Mn]=0,08%; значення температури чавуну складало відповідно 1449<sup>o</sup>C та 1462<sup>o</sup>C. Показники шлакового режиму відрізнялися значенням відношення Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/MgO (відповідно – 1,19 та 1,28), перша основність шлаку CaO/SiO<sub>2</sub> мала однакові значення – 1,09.

Результати прогнозної оцінки найбільш важливих технологічних властивостей кінцевого шлаку, які розраховано в системі «Шлак», показали наступне. В'язкість кінцевих шлаків при температурі 1500<sup>o</sup>C для ДП-А трохи нижче, ніж для ДП-Б внаслідок підвищеного значення магnezії для ДП-А (значення відповідно 0,23 Па.с та 0,28 Па.с), проте в'язкість шлаку, розрахована при температурі чавуну, відповідної температурі шлаку, для ДП-А вище - 0,37 Па.с, для ДП-Б – 0,33 Па.с, що пояснюється більш високими значеннями температури чавуну для ДП-Б. Облік незгорілих частинок коксу і пиловугільного палива збільшує значення в'язкості шлаку з урахуванням його гетерогенності для умов ДП-Б в більшій мірі в порівнянні з ДП-А, що пов'язано з підвищеним значенням витрати ПВП для другої печі. Значення ентальпії

шлаку для ДП-Б трохи вище, що характеризує шлаки як більш прогріті (для ДП-А – 1840 кДж/кг, для ДП-Б – 1855 кДж/кг). Десульфуруюча здатність шлаків ДП-Б по сірці поглинаючій здатності і ступеню досягнення рівноваги по сірці практично однакові, проте, вміст сірки в чавуні для ДП-Б відповідає ТУ:  $[S] = 0,025\%$ , при цьому для ДП-А  $[S] = 0,037\%$ , що пов'язано з якістю коксу, нестабільними властивостями використаного в якості ПВП вугілля, а також сформованим тепловим станом низу печі.

В цілому, модельний комплекс системи «Шлак» дозволяє проводити оперативний контроль і вибір оптимального шлакового режиму з урахуванням особливостей сировинних і енергетичних умов доменної плавки для виплавки чавуну заданої якості.

1. Тогобицька Д.М. Розвиток модельного комплексу експертної системи контролю та управління шлаковим режимом доменної плавки в сучасних шихтових та технологічних умовах / Д.М. Тогобицька, А.І. Белькова, Д.О. Степаненко та ін. // *Фундаментальные и прикладные проблемы металлургии: сб. научн. трудов.* – 2020. – Вып. 34. – С. 30-46.

УДК 622.781:662.788.3

### **РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ЗАЛІЗОРУДНОЇ МОНОСИРОВИНИ ДЛЯ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ**

**Є.В. Чупринов, к.т.н., В.П. Лялюк, д.т.н., Ф.М. Журавльов, к.т.н.,  
Д.А. Кассим, д.т.н., І.А. Ляхова, к.т.н.**

**Учбово-науковий технологічний інститут ДУЕТ, м. Кривий Ріг**

Розроблені і випробувані технологічні режими отримання нових видів кускування залізородних матеріалів і моносировини для доменної плавки. Розроблені матеріали мають кращі металургійні характеристики агломератів і обкотишів, мають в своєму складі підвищений вміст заліза і залишковий вуглець. Розрахунки показують, що використання цього матеріалу в доменному виробництві дозволить істотно поліпшити техніко-економічні показники виплавки чавуну.

УДК 669.184

### **СУЧАСНИЙ СТАН ВИКОРИСТАННЯ ОДНОЯРУСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ВЕРХНІХ ФУРМ ТА УМОВ РОБОТИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНИХ ЦЕХІВ УКРАЇНИ**

**П.О. Юшкевич, к.т.н.**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

На сьогодні найбільшого поширення в Україні та світі отримали багатосоплові конструкції одноярусних фурм, що мають для продувки розплаву групу надзвукових сопел Лавалля та за необхідності додаткові циліндричні сопла у накінецьнику.

Такий тип фурм застосовується як у конвертерах верхньої так і комбінованої продувки у ведучих металургійних державах: Америці (США); Україні; країнах Європейського Союзу (ЄС); Китаї; Японії; Індії та ін. Кількість сопел у накінецьнику цих фурм може складати від 2 до 12 шт., за садки промислових конвертерів від 5 до 400 т.

Не зважаючи на широке поширення такого типу конструкцій одноярусних фурм у наш час в Україні та світі, вони мають обмежені можливості з точки зору керуючого впливу на перебіг продувки. Під час верхньої продувки насамперед керуючими діями є зміна витрати кисневого

дутья та висоти розташування фурми відносно рівню розплаву у спокійному стані. У випадку комбінованої продувки конвертерної ванни з'являється можливість роздільного керування витратами верхнього та донного дутья, а також одночасної продувки двома типами газів.

Обмеження такими керуючими діями під час отримання залізобуглецевого напівпродукту є несприятливим в сучасних умовах роботи киснево-конвертерних цехів України, так як зараз спостерігається ряд ускладнень у забезпеченні роботи, що пов'язані з:

- недостатньою якістю шихти з підвищеним вмістом S та P у вихідній металошихті;
- перевищенням вартості лому над вартістю чавуну;
- змінними умовами шихтування конвертерної плавки, через коливання складу та температури чавуну;
- відсутністю налагодженого багаторівневого систематизованого сортування брухту;
- незадовільною якістю вапна, дефіцитом плавикового шпату й магnezіальних шлакоутворювальних матеріалів;
- відсутністю присадок залізо- і марганцевмісних сировинних добавок (залізородних окатишів, марганцевої руди, агломерату) у ході продувки;
- застосуванням для охолодження перегрітих плавок присадок вапняку й продувки ванни технологічним азотом;
- обмеженим застосуванням ковшової десульфурзації чавуну перед заливанням у піч металу та подальшої комбінованої продувки розплаву у конвертерному агрегаті.

## ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ

УДК 669.187.56

### ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПРОЦЕСУ З РІДКИМ МЕТАЛОМ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВЕЛИКОВАГОВИХ ЗЛИТКІВ

Л.Б. Медовар д.т.н.<sup>1</sup>, Г.П. Стовпченко д.т.н.<sup>1,2</sup>, Г.О. Полішко д.т.н.<sup>1</sup>, А.В. Сибір к.т.н.<sup>3</sup>  
Д.В. Коломієць<sup>1</sup>

1 - Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, м. Київ

2 - ПП «ЕЛМЕТ-РОЛ», м. Київ

3 - Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро

Електрошлаковий перепад є одним з основних процесів спеціальної електрометалургії для одержання великовагових злитків завдяки рафінуванню складу металу, підвищенню його щільності, зменшенню ліквациї, тощо. Сьогодні вдосконалення технології і обладнання електрошлакового перепаду спрямовано перш за все на покращення умов формування злитків для гарантованого одержання однорідної та бездефектної внутрішньої структури і гладкої поверхні, однак важливим є й зниження енерговитрат, які становлять суттєву частину собівартості злитків ЕШП.

Вирішенню обох задач вслуговує електрошлакова технологія з використанням замість витратного електроду рідкого металу (ЕШП РМ), якого подають з підігрівного пристрою в струмопідвідний кристалізатор. Цей метод формування електрошлакового злитка було винайдено наприкінці минулого сторіччя й реалізовано в промисловості для наплавлення валків прокатних станів. Подальший досвід показав, що за допомогою цієї технології можна виготовляти також суцільні, порожнисті та композитні (з коаксіальним та горизонтальним розташуванням шарів) зливки, що дає можливість виготовляти на одній установці ЕШП РМ великий сортамент продукції.

Зрозуміло, що використання електрошлакового процесу з рідким металом (ЕШП РМ) замість традиційного ЕШП виключає технологічні операції й втрати металу, пов'язані з виготовленням витратного електроду. Окрім того, за рахунок меншого на 70-90 градусів (якнайменш) перегріву розплаву ЕШП РМ при однаковій з ЕШП продуктивності може забезпечити економію витрат на електроенергію 35...55 %, а за підвищеної на 15 % ще відповідно більшу, що надає перспективи використання розробленої технології та обладнання в промисловості. В той же час, організація стабільної подачі рідкого металу потребує проєктування технологічного циклу розливання металу, і визначення раціональних об'ємів підігрівного розлиального пристрою (проміжного ківшу) та печі, в якій готуватимуть розплав для його наповнення. Основними параметрами, які визначають об'єм підігрівного розлиального пристрою (ПРП) та садку печі, що постачає в нього розплав, є діаметр та швидкість формування злитку ЕШП. Для великих злитків (діаметром 2000 – 2500 мм), виплавка яких триває багато годин, дуже важливо при відмові обладнання запобігти перериванню подачі металу, що забезпечує від порушення формування структури та утворення внутрішніх та поверхневих дефектів. Тому для резервування й забезпечення безперервної роботи на печі ЕШП РМ доцільним є використання двох розливальних пристроїв, які працюють для великих злитків в парі, а в разі виготовлення злитків меншого діаметру - по черзі. При проєктуванні технологічного процесу передбачали наявність постійного запасу металу в кожному з них (для виключення проблем з застиганням футерівки) і, в той же час, мінімальний час витримки металу, щоб зменшити витрати електроенергії.

Розрахунками показано, що для виготовлення злитків суцільного перерізу діаметром 500-2500 мм ані за продуктивності характерної для ЕШП з витратним електродом, ані за адекватно підвищеної (на 15% за рахунок зниження перегріву металу) забезпечити безперервну розливу металу неможливо.

## ТЕХНОЛОГІЇ ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ ЧАВУНУ ТА СТАЛІ

УДК 669.184

### АНАЛІЗ РЕАКЦІЙ, ЩО ПРОТЕКАЮТЬ ПРИ ОДНОСТАДІЙНОМУ РАФІНУВАННІ РІДКОГО ЧАВУНУ ВІД СІРКИ І КРЕМНІЮ

В.Г. Кисляков, к.т.н., Л.С. Молчанов, к.т.н., О.С. Вергун, д.т.н., В.П. Петруша, м.н.с.

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

Питання підвищення техніко-економічної ефективності процесів виробництва сталі потребує розробки та впровадження інноваційних технологій позапічного рафінування чавуну від надлишкового вмісту кремнію та сірки. З позицій енергоефективності, даний процес краще за все проводити сумісно (екзотермічний ефект від видалення кремнію компенсує ендотермічний ефект процесів десульфурації). Відповідно до запропонованого технічного рішення, що передбачає одночасне видалення з рідкого чавуну кремнію і сірки, передбачено проведення технологічної операції у дві стадії [1-3]: попередня подача в рідкий чавун алюмінію у відповідності до теплового балансу процесу; подальше видалення сірки за рахунок взаємодії чавуну зі шлаком, що формується при вдуванні порошкоподібного вапна у потоці технічного кисню. Шлак утворюється при взаємодії СаО з продуктами окислення елементів чавуну киснем дуття.

З метою визначення фізико-хімічних особливостей процесу комплексного рафінування рідкого чавуну було проведено термодинамічний аналіз основних хімічних реакцій, що можуть протікати в об'ємі рідкого чавуну при рафінуванні, були побудовані графічні залежності енергії Гібса для зазначених реакцій від температури (рис. 1).

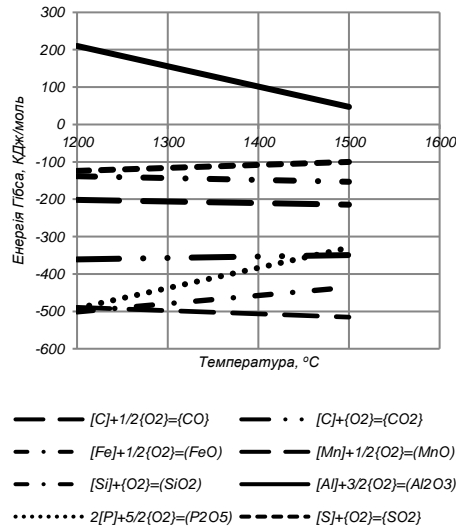


Рис. 1 – Графічна залежність енергії Гібса від температури для процесів взаємодії компонентів рідкого чавуну з газоподібним киснем при одночасній десульфурації та знекремнювання.

Відповідно до даних, представлених на рис. 1, можна зробити висновок, що в діапазоні температур 1200 – 1500°C пріоритетним хімічним перетворенням буде процес окислення кремнію та інших домішок (за винятком алюмінію) за рахунок взаємодії з газоподібним киснем. Розчинений у рідкому чавуні алюміній при цьому буде зберігатися для забезпечення процесу десульфурації розплаву.

Також зроблено висновок, що процес десульфурації рідкого чавуну за рахунок взаємодії твердих часток вапна з розчиненими у розплаві сіркою та алюмінієм може протікати у всьому

діапазоні розглянутих температур. Крім цього, паралельно з протіканням процесу десульфурації буде протікати утворення двокальцієвого силікату.

Проведений термодинамічний аналіз дозволив виявити теоретичні передумови для здійснення технологічної операції з одночасним видаленням сірки і кремнію за рахунок інжекції порошкоподібного вапна у потоці кисню при попередній подачі алюмінію в розплав.

### Список літератури

1. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 1. Термодинамические и кинетические закономерности. Кнепель Г. – М.: Металлургия, 1973. – 312с.
2. Меджибожский М.Я. Основы термодинамики и кинетики сталеплавильных процессов. – Киев-Донецк: Вища школа, 1979. – 280с.
3. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов: Учеб. пособ. для вузов. – М.: Металлургия, 1988. – 288с.

УДК 669.162

## МЕХАНІЗМ УТВОРЕННЯ КОРОЛЬКІВ У ПОКРИВНОМУ ШЛАКУ ПРИ КОВШОВОМУ РАФІНУВАННІ РОЗПЛАВУ

А.А. Похвалітий к.т.н., Є.М. Сігарьов д.т.н., О.О. Вовк

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

З метою уточнення механізмів формування крапель у покривному шлаку при використанні заглибної фурми для продувки ванни у ковші у період післяпродувного перемішування провели серію експериментів на моделі ковшу (1:12 по відношенню до 230-т ковшу конвертерного цеху ПАТ «ДМК» з використанням критеріїв Архімеду, Лапласа, Фруда та відповідних симплексів. Визначені умови переміщення та накопичення металу у шлаковому шарі за відсутності інтенсивного перемішування останньої (за умов ламінарного режиму,  $Re \leq 1$ ). Визначено, що механізми потрапляння, накопичення крапель металу у шарі покривного шлаку та повернення металу до металеві ванни за рахунок гравітаційних сил можна класифікувати наступним чином.

До першого механізму віднесли «змивання» металеві оболонки з поверхні пузиря при перетинанні границі «метал-шлак». В такому випадку рідкий метал, під впливом сил поверхневого натягу у вигляді крапель шароподібної форми накопичується у шарі шлаку, який щільно контактує з основною металеві ванною. У такому випадку вплив товщини шлаку на повернення металевих крапель до ванни мінімізується.

До другого механізму віднесли відрив металеві «шлейфу» у шлаковому шарі товщиною  $H_{\text{шл}}$  з подальшим опусканням шароподібних крапель рідкого металу крізь шлак до границі «метал-шлак» і поверненням у металеві ванну по аналогії з формуванням «рідкої лінії току». Встановлено, що рівень відриву металеві «шлейфу» від пузиря у шлаковому шарі, можна описати виразом  $H_{\text{х}} = 0,264 \cdot H_{\text{шл}}$ . Так, для умов десульфурації чавуну у 230-т заливальному ковші на УДЧ конвертерного цеху ПАТ «ДМК», цей показник може скласти 0,39-0,48 від висоти шлакового покриву в залежності від зміни в'язкості шлаку.

До третього механізму формування та накопичення металевих крапель у шлаку віднесли повернення у ванну залишків металеві плівки після розриву газові пузиря на границі «оточуюче середовище-шлак». У такому випадку, при спливанні поодиноких пузирів останні, після досягнення вказаної границі утворюють газову порожнину над поверхнею шлаку, яка після досягнення відповідного значення внутрішнього тиску, розриває металеві оболонку купола з викиданням металевих крапель у оточуюче середовище та на поверхню шлаку. Утворені металеві краплі відносно невеликого розміру частково опускаються у шлаку симетрично до шляху підйому спливаючих газових пузирів, а частково залишаються у верхніх



шарах шлаку. У свою чергу, металева оболонка з нижньої частини газової порожнини, після руйнування останньої, осідає крізь шар шлаку до границі «метал-шлак» та у металеву ванну.

При спливанні агломерацій пузирів третій механізм утворення та повернення до металевої ванни крапель металу превалює над іншими. Для умов 230-т ковшу мінімальний час повернення металу з шлаку до металевої ванни, як і очікували, отриманий для в'язкості шлаку у діапазоні 0,1 - 0,25 Па·с та товщини останнього до 150 мм, з перевищенням цієї величини тривалість опускання металевих крапель різко збільшується.

Таким чином, до основних умов повернення крапель металу із покривного шлаку до металевої ванни у період «післяпродувного перемішування», можна віднести забезпечення мінімальної в'язкості шлаку, підвищення градієнту густини чавуну та шлаку, мінімізацію значень товщини шлакового шару на поверхні ванни, створення умов для коалесценції крапель металу у шарі шлаку. Використання останнього фактору для досягнення завдань зменшення втрат металу зі шлаком, що скачують після десульфурації з поверхні ванни, представляється особливо ефективним внаслідок того, що радіус крапель входить до ряду виразів для визначення швидкості осадження у квадраті.

УДК 669.18 (075.8)

## ДО ПИТАННЯ ВИНЕСЕННЯ КРАПЕЛЬ РОЗПЛАВУ ЗА МЕЖІ КОВША

А.А. Похвалітій, к.т.н., Є.М. Сігарьов, д.т.н., Г.О. Носенко

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Зменшення втрат чавуну при ковшовій десульфурації перед сталеплавильним переділом залишається актуальним завданням. В умовах лабораторії кафедри МЧМ Дніпровського ДТУ виконали серію досліджень, з застосуванням техніки високотемпературного моделювання, процесу продувки розплаву переробного чавуну нейтральним газом (аргоном) крізь заглибну фурму з одним боковим соплом. Завданням було визначення висоти та відстані польоту металевих крапель, що утворилися при розриві спливаючих пузирів газу-носію.

Для вдування аргону вглиб ванни використали заглибну фурму з наконечником з соплом діаметром 0,006 м. Витрата аргону на продувку ванни складала 0,08-0,04 м<sup>3</sup>/хв. Маса розплаву переробного чавуну, що продували нейтральним газом – 100 кг при глибині ванни – 0,40 м, розміщеному у тиглі індукційної печі глибиною 0,67 м. Діаметр поверхні ванни металевого розплаву складав 0,245 м. Процес продувки розплаву фіксували високошвидкісною зйомкою.

З метою визначення впливу кута нахилу поверхні пузирів, що розриваються при виході на поверхню ванни, на довжину шляху польоту крапель порівняли картину вильоту крапель за межі 230-т промислового заливального ковша ПАТ «Дніпровський меткомбінат» при проведенні десульфурації чавуну. За результатами обробки отриманих даних визначені характерні кут вильоту ( $\alpha$ ), діапазон висоти вильоту крапель над ванною ( $h$ ), траєкторія, відстань  $l$  та тривалість їх польоту ( $\tau$ ) до контакту з поверхнею ванни або робочого майданчика. Встановлено, що у досліджених умовах при продуванні ванни у 230-т заливальному ковші  $h$  та  $L$  складають відповідно 0,55-0,83 м та 1,2-1,9 м; для високотемпературної моделі ковшу відповідні значення – 0,22-0,35 м та 0,5-0,76 м. З врахуванням відомих даних стосовно розподілу металевих корольків за розмірами найбільш вірогідним при розриві газових пузирів є виліт крапель металевого розплаву у 230-т заливальному ковші під кутами у діапазоні 35-45 град за межі ковша. При меншому куті вильоту можливим є накопичення корольків у покривному шлаку. Це підтверджує визначальну роль шлакового покриву та необхідність подальшого удосконалення шлакового режиму ківшової десульфурації переробного чавуну з метою зменшення втрат заліза.

УДК 669.02/09:669.17.046.517В

## НОВИЙ ПІДХІД ДО ВИРШЕННЯ ЗАДАЧ ОЦІНКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСВОЄННЯ ДОБАВОК ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ

Д.М. Тогобицька д.т.н., проф., В.П. Піптюк к.т.н., І.Р. Снігура м.н.с., С.В. Греков н.с.,  
О.В. Кукса к.т.н.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

Виплавка сталі необхідної якості обумовлена значними труднощами, оскільки пов'язана з протіканням складних фізико-хімічних процесів, частина з яких важко піддається управлінню. Саме застосування у технологічній схемі виплавки залізовуглецевого напівпродукту етапу доведення на агрегаті ківш-піч відкрило перспективу розробки унікальних способів розкислення, рафінування та доведення сталі за хімічним складом, методами легування й мікролегування [1]. Незважаючи на значні успіхи фундаментальних наук в поясненні механізму процесів, що протікають при позапичній обробці металевго напівпродукту, накопичені знання ще не достатні для реального управління виробництвом того чи іншого сплаву, оскільки відомості щодо величини реальних взаємодій у розплавах неоднозначні і потребують постійного пошуку. В цьому зв'язку розробка критеріїв та комплексних показників на основі аналізу електронної будови компонентів і результатів їхньої взаємодії в системі «метал-шлак» при позапичній обробці на установці ківш-піч є актуальною.

У якості оцінки ефективності процесів доводки сталі запропоновано показники розподілу елементів в системі «метал-шлак» Лел, які є результатом реалізації нерозривного ланцюгового зв'язку «Склад – Технологія – Структура – Властивості». Ґрунтуючись на відправних позиціях концепції спрямованого хімічного зв'язку [2] та врахуванні значимих параметрів міжатомної взаємодії металургійних розплавів (шлаків, сталей, добавок) у поєднанні з факторами технології обробки нами отримані аналітичні вирази по кількісному вираженню розподілу елементів зокрема кремнію, марганцю, сірки у багатофазовому середовищі при позапичній обробці підшипникових (ШХ-15) та конструкційних (09Г2С) сталей та їх модифікацій з високою точністю прогнозу  $R^2 \geq 0,9$ .

Принципова відмінність запропонованого підходу від відомих методів, де враховуються тільки балансові співвідношення між початково введеним та кінцевим вмістом добавки, полягає у врахуванні фізико-хімічних властивостей металу, шлаку, добавок та їх комплексних співвідношень у поєднанні з параметрами впливу технології та техніко-економічними показниками процесів позапичного доведення сталі. В результаті проведеного аналізу отримано адекватні моделі для обчислення коефіцієнтів розподілу Si та Mn в залежності від інтегральних параметрів початкового хімічного складу сталі, шлаку та параметрів технології, які мають вигляд:  $L_{Si} = f(Z_{поч}^{y_{Me}}, T_{плFeMn} / T_{сталі}, I_{прод})$ ;  $L_{Mn} = f(d_{поч}^{Me}, tg\alpha_{поч}^{Шл}, T_{плFeSi} / T_{сталі}, T_{поч}^{Me}, I_{прод})$ . Експертна оцінка моделей проводилась шляхом зпівставлення отриманих розрахункових значень з фактичним кінцевим розподілом елементів.

Одержані закономірності покладені в основу розробки алгоритму прогнозування закономірностей розподілу елементів при доведенні сталі на УКП та оцінки реалізації потенційних можливостей легуючої та рафінуючої складових добавок, що використовуються.

### Література:

1. Охотский В.Б. Эволюция сталеплавильных технологий. Внепечные процессы. – Металлургическая и горнорудная промышленность. 2012. №7. – С. 107 – 109.
2. Приходько Э.В. Эффективность комплексного легирования сталей и сплавов. – К.: Наукова думка, 1995. – 292с.

## ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНЖЕКТУВАННЯ ЗЕРНИСТОГО МАГНІЮ ПРИ РІЗНИХ УМОВАХ КОВШОВОГО РАФІНУВАННЯ ЧАВУНУ

С.А. Шевченко, канд. техн. наук, В.І. Єлісєєв, канд. техн. наук, Б.В. Двоскін, канд. техн. наук.

Впровадження інжекційних процесів ковшового рафінування розплаву чавуну у різних умовах металургійного виробництва потребує відповідно і адаптації технологічних параметрів до нових умов, встановлення їх раціональних меж. Особливо це стосується технологічного процесу десульфурзації розплаву чавуну в ковшах зернистим магнієм, що інjektується в струмені інертного газу на глибину ванни із за допомогою фурм, що занурюються. Зважаючи на якості магнію, його легкоплавкість та відносно низьку температуру кипіння, технологічна реалізація цього процесу можлива лише за умови дотримання вузьких меж технологічних параметрів інjektування: типорозмір частинок магнію, інтенсивність подачі реагенту, витрати транспортуючого газу, швидкість витоку струменю з сопла фурми, тощо.

У даній роботі представлено основні принципи створення методики для визначення раціональних параметрів інjektування зернистого магнію під час рафінування розплаву чавуну в ковшах різної ємності (від 0,1 до 400 т).

Основу методики складають аналітичні вирази та моделі, що описують залежності раціональних параметрів інжекції магнію від різних умов реалізації процесу та встановлені взаємозв'язки між ними. Їх створено з урахуванням теоретичних уявлень про процес інжекції двофазного струменю під рівень рідкої ванни після експертного та статистичного аналізу значного масиву фактичних даних інжекційних обробок чавуну, що було реалізовано в різних умовах, від малогабаритних моделей ковшів ємністю 0,1 т (у лабораторних умовах) до великовантажних ковшів ємністю 300 т (в умовах великопромислового виробництва сталі). Встановлено наступні аналітичні залежності:

- Рекомендована висота вільного борту залежно від діаметру ковша;
- Інтенсивність подачі магнію у розплав залежно від діаметру ванни, висоти вільного борту та типу фурми;
- Діаметр сопла залежно від інтенсивності подачі магнію;
- Швидкість витоку газового струменю з сопла залежно від діаметру сопла;
- Витрати газу що забезпечують стабільну інжекцію зернистого магнію залежно від необхідної швидкості витоку газу та глибини занурення фурми.

Таким чином методика дозволяє отримати раціональні технологічні параметри інjektування зернистого магнію різними типами фурм при обробці ковшів різної ємності (0,1 – 400т).

Отримані раціональні параметри ведення процесу дозволяють скомпонувати відповідну інжекційну систему. Для цього було розроблено універсальну методику вибору геометричних параметрів компонування тракту інжекційної системи для відповідної ємності ковша, що обробляється та типу фурменого пристрою.

Для зручності користування розроблена методика впроваджена у програмному середовищі Microsoft Excel, де, після введення вхідних умов, розрахунок параметрів відбувається автоматично.

Наведені у роботі основні принципи дозволяють зважено обирати раціональні технологічні параметри обробки чавуну зернистим магнієм та розробити відповідну інжекційну систему що дозволяє забезпечити технологічність протікання процесу в умовах обробки ковшів різної місткості, від лабораторного до великовантажного.

УДК 669.162.267.6

## ПОКАЗНИКИ ВДУВАННЯ МАГНІЮ У КОВШІ РІЗНИХ ТИПОРОЗМІРІВ ДЛЯ ОСОБЛИВО ГЛИБОКОГО РАФІНУВАННЯ ЧАВУНУ ВІД СІРКИ

А. П. Шевченко, д.т.н., Б. В. Двоскін, к.т.н., І. О. Маначин, к.т.н.

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України м. Дніпро

Потреба в металопродукції з особливо низьким сумарним вмістом шкідливих домішок -  $\leq 0,005\%$  постійно зростає. У зв'язку з цим особливо посилилися вимоги до вмісту сірки в рідкому чавуні, що йде на виплавку сталей з особливими властивостями і характеристиками [2, 4-7]. Завдання отримання чавуну з особливо чистим вмістом сірки, аж до  $\leq 0,002\%$  при мінімальних витратах, стає все більш актуальним. Світова практика сталеваріння показує, що найбільш ефективним і економічно обґрунтованим шляхом отримання особливо чистого чавуну по сірці є застосування процесів його позапічного рафінування [1-7]. Технологічні параметри процесів десульфурації чавуну інжекцією зернистого магнію фурмами з випарними камерами на сталезаводі №1 Уханського МК і двосопловими фурмами на сталезаводі №2 концерну «CSC» забезпечили необхідні цикли обробки, надійне і технологічне інжектування магнію і його ефективне засвоєння. Мав місце великий «вільний борт» при використанні двосоплової фурми в КДЧ концерну «CSC» і не пов'язаний з обмеженням наливу ковша через процес обробки, а був обумовлений виробничими вимогами до маси чавуну при KR-процесі. Відомо [7], що застосування двосоплових фурм при обробці чавуну в 150-тонних ковшах дозволило зменшити «вільний борт» до 0,4 м, а в частині ковшів до 0,1 - 0,2 м. Незважаючи на те, що при застосуванні двосоплових фурм потрібно збільшити витрату газу до 140 м<sup>3</sup>/год, концентрація магнію в газоносії (в середньому 27,5 кг/м<sup>3</sup>) була вищою, ніж при використанні фурм з випарними камерами, (в середньому 20,5 кг/м<sup>3</sup>), за рахунок збільшення інтенсивності подачі магнію (в середньому 16 кг/хв). Аналіз показників десульфурації чавуну вдуванням зернистого магнію в КДЧ сталезаводу №1 Уханського МК і в КДЧ сталезаводу №2 концерну «CSC» показав, що відпрацьовані і освоєні технологічні процеси особливо глибокої десульфурації чавуну характеризуються високими показниками: ступінь десульфурації чавуну - аж до 99% (в середньому 95,2 і 96,3% відповідно); досягається кінцевий вміст сірки в чавуні - аж до 0,0002% (в середньому 0,0015 і 0,0012% відповідно); витрата магнію на сірку віддалену - в середньому 2,2 і 1,9 кг/кг відповідно; питома ступінь десульфурації чавуну - в середньому 18,9 і 22,4%/0,1 кг/т магнію відповідно; швидкість процесу десульфурації - в середньому 12,8 і 12,2% / хв відповідно; ступінь засвоєння магнію на сірку віддалену - в середньому 39,8 і 43,9% відповідно. Також встановлено, що важливим технологічним прийомом, що підвищує стабільність показників, що досягаються, процесу обробки, є коригування складу ковшового шлаку, яка проводилася добавкою відходів зернистого вапна в кількості 1,0 - 2,0 кг/т чавуну і не вимагала значних витрат. Освоєння в КДЧ сталезаводу №1 Уханського МК і в КДЧ сталезаводу №2 концерну «CSC» технологічні процеси особливо глибокої десульфурації чавуну економічно виправдані для використання в практиці підготовки чавуну до конвертації.

Список літератури

1. Кудрин В.А. Внепечная обработка чугуна и стали. – М., Metallurgiya: 1992. – 335 с.
2. Nadif M., Suero I., Rodesly C. Методы десульфурации на предприятиях Arcelor Mitall Fiat Western Europe. Новости черной металлургии за рубежом. М., 2010. – № 3. – С. 32–34.
3. Воронова Н.А. Десульфурация чугуна магнием. М.:Металлургия. 1980.–239 с.
4. Шевченко А.Ф., Большаков В.И., Башмаков А.М. Технология и оборудование десульфурации чугуна магнием в большегрузных ковшах. Киев. Наукова думка. – 2017. – 205 с.
5. Установки вторичной металлургии компании CSC. Успех через качество / Се Хонг-Чи, Т. Айхерт, Д. Темберген, Р. Теборте // Черные металлы. 2008. № 9. С. 26–31.
6. Найдек В.Л. Повышение эффективности металлургических технологий внепечной обработки железоуглеродистых расплавов. Киев. Сб. докладов международной конференции.

Производство стали в XXI веке. Прогнозы. Процессы, технологии, экономика. Изд. ЗАО "Укрсплав". 2000. – С. 16–23.

7. Шевченко А.Ф., Маначин И.А., Вергун А.С. и др. Внепечная десульфурация чугуна в ковшах. Технология. Исследования. Анализ. Совершенствование. Днепропетровск. "Дніпро-VAL". – 2017. – 253 с.

## МЕТАЛОЗНАВСТВО ТА ТЕРМІЧНА ОБРОБКА СТАЛІ

УДК: 669.14.018.29: 620.18: 621.746.001.8

### АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЕФОРМАЦІЙНОГО ПРОРОБЛЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОЛИТИХ ЗАГОТОВОКНА МАКРО- І МІКРОСТРУКТУРУ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ

О.І. Бабаченко, д.т.н., К.Г. Дьоміна, к.т.н., О.А. Сафронова, О.Л. Сафронів

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро

На підставі аналітичного огляду літературних даних щодо аналізу впливу гарячої деформації на показники якості та існуючих способів оцінки деформаційного пророблення макро- та мікроструктури металопродукції з конструкційних сталей були отримані наступні результати. Сучасні технології виробництва безперервнолитих заготовок і гарячої прокатки дозволяють забезпечити відповідність якості поверхні, макро- і мікроструктури, механічних властивостей прокату при коефіцієнті загальної витяжки  $\lambda = 3-6$  для сортового прокату і  $\lambda = 2,5-4$  для трубних заготовок. Усунення анізотропії механічних властивостей можливо при коефіцієнті загальної витяжки  $\lambda = 7 - 10$ , але тільки при  $\lambda = 18$  і більше досягається досить чітка волокниста структура, при цьому залишків литої (дендритної) структури не спостерігається. Для виробництва сортового прокату з контрольованою макроструктурою при малих ступенях обтиску необхідно, щоб в макроструктурі безперервнолитих заготовок точкова неоднорідність не перевищувала її стандартних значень для готового прокату, а осьова пористість і осьова хімічна неоднорідність не перевищували цих вимог більш, ніж на 1,5 і 0,5 бала відповідно. Мінімальний коефіцієнт витяжки, необхідний для мінімізації дефектів макроструктури та стабілізації механічних властивостей, збільшується з ростом вмісту вуглецю та легуючих елементів в сталі (в першу чергу, це відноситься до показників пластичності та ударної в'язкості). На пророблюваність структури сталі під час гарячої деформації впливає розмір початкової безперервнолитої заготовки через її макроструктуру та схему напружено-деформованого стану: чим більше переріз БЛЗ, тим більш нерівномірна лита структура та несприятливий напружено-деформований стан в центральній зоні заготовки. Для оцінки *прямого* впливу деформаційної дії на мікроструктуру конструкційних сталей використання коефіцієнта пророблюваності структури  $K$  дозволяє виконати кількісну оцінку інтенсивності та локалізації деформації в об'ємі заготовки та дає можливість аналізувати технологічні процеси обробки металів тиском зі свідомо високим ступенем нерівномірності деформації.

УДК621.771.294.003.12(043)

**ОБГРУНТУВАННЯ ПОДХОДУ ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ  
ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІС****О.І. Бабаченко, д.т.н., Г.А. Кононенко, к.т.н. Є.С. Клемешов, Р.В. Подольський,  
О.А. Сафронова****Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

Досліджено вплив хімічної мікронеоднорідності в ободах залізничних коліс різного хімічного складу на утворення гартівних структур при прискореному охолодженні та на механічні властивості. За результатами аналізу впливу хімічних елементів на кінетику фазових перетворень встановлено, що зміни хімічного складу сталі в межах марочного та з урахуванням хімічної мікронеоднорідності, значно впливають на кінцевий фазовий склад та на рівень механічних властивостей.

Експериментально в лабораторних умовах за власною методикою визначений інтервал припустимих швидкостей охолодження поверхневих і центральних ділянок ободу коліс різного хімічного складу при прискореному охолодженні: максимальних припустимих швидкостей охолодження поверхні катання для запобігання утворення структур гарту і мінімально необхідних швидкостей охолодження центральних ділянок ободу колеса з утворенням однорідної структури та високих механічних властивостей.

Обгрунтовані підходи до вдосконалення параметрів термічної обробки залізничних коліс зі сталей різного хімічного складу з урахуванням хімічної неоднорідності, для забезпечення формування рівномірної мікроструктури та високих показників надійності та довговічності. Розроблені рекомендації щодо режимів зміни витрати охолоджувача (коефіцієнту тепловіддачі охолоджуючої системи) в процесі прискореного охолодження.

УДК 621.771.294:620.17

**ПОРІВНЯЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВТОМНОЇ ДОВГОВІЧНОСТІ ПО ПЕРЕРІЗУ  
ЗАЛІЗНИЧНИХ ВІСЕЙ РІЗНОЇ ЯКОСТІ****О.І. Бабаченко, д.т.н., Г.А. Кононенко, к.т.н., О.А. Сафронова, О.П. Клинова****Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, м. Дніпро**

Ресурс осі залежить від багатьох показників, які визначають її службові характеристики. Це хімічний склад та технологія виробництва сталі, рівень міцності, пластичних і в'язких властивостей, напруженого стану та інше. Одним з найважливіших технічних показників працездатності осі є її опір втомному руйнуванню.

В роботі визначена втомна довговічність залізничних осей з внутрішніми дефектами(контроль ультразвуковим методом ) (ось № 178, партія 2) та без них (ось №143, партія 1) марки EA1N, виготовлених на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» за стандартом EN 13261:2020.

Метою досліджень було визначення втомної довговічності зразків (кількість циклів до руйнування) при значеннях напруження в діапазоні 260...262 МПа, вирізаних з поверхневих, внутрішніх (1/2 радіуса) та центральних шарів металу осей різної якості.

Встановлено, що поверхневий шар осей має більш високі значення втомної довговічності в порівнянні з шаром на глибині 1/2 радіуса осі, та центральною частиною.

Проведено, порівняльний аналіз відповідних зразків по перерізу осі. За результатами досліджень залізничних осей №143 та № 178 плавки № 204497 встановлено, що втомна довговічність осі №143 по всьому перерізу вища у порівнянні із віссю №178.

Було виявлено, що при напруженні 262...260 МПа поверхневий шар осі №143 має рівень втомної довговічності більше на 79,8% в порівнянні з віссю №178, внутрішній шар на глибині  $\frac{1}{2}$  радіуса осі №143 на 60,4% більше в порівнянні з віссю №178 та центральної частини осі №143 на 10,3 % більше в порівнянні з №178.

УДК 669.14:621.785.4

### **ВПЛИВ РЕЖИМІВ ЗМІЦНЕННЯ ТА НАСТУПНОЇ КРІОГЕННОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ, ТВЕРДІСТЬ І ЗНОСОСТІЙКІСТЬ СТАЛІ 38ХНЗМФА**

**С.В. Бобирь, д.т.н., Г.В. Левченко, д.т.н., Е. Е. Барановська, к.т.н., Д.В. Лошкарев**

**Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро**

Показано, що кріогенна обробка термічно покращеної сталі 38ХНЗМФА сприяє підвищенню твердості, в'язкості і зносостійкості сталі 38ХНЗМФА. При цьому відбувається деяке збільшення параметра і величини мікронапружень кристалічної решітки, підвищення щільності дислокацій через зняття термічних напружень. Для отримання багатофазної структури сталі 38ХНЗМФА із залишковим аустенітом запропоновано ізотермічне гартування з  $\gamma$  -  $\alpha$ -області. Застосування кріогенної обробки для дослідного режиму зміцнення зразків сталі 38ХНЗМФА сприяє перетворенню залишкового аустеніту в кінцевій структурі в мартенсит з істотним збільшенням мікротвердості її структурних складових. Дослідний режим зміцнення + кріогенна обробка забезпечує значне підвищення твердості і зносостійкості сталі 38ХНЗМФА при забезпеченні певного рівня її ударної в'язкості (більше 4 Дж/см<sup>2</sup>) і може бути рекомендований для реалізації технології диференційованого зміцнення великогабаритних виробів зі сталі 38ХНЗМФА.

УДК 669.15

### **СУЧАСНІ НАПРЯМКИ ПО ПІДВИЩЕННЮ СТУПЕНЮ ВИКОРИСТАННЯ АЛЮМІНІЮ ПРИ РОЗКИСЛЕННІ СТАЛІ**

**Ю.О. Бубликов к.т.н., О.В. Івченко к.т.н., Г.А. Поляков, С.М. Підгорний**

**Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

Розглянуто і проаналізовано існуючі способи розкислення та легування сталі алюмінієм. Запропоновані найбільш перспективні методи введення алюмінію в залізо-вуглецевий розплав, що дозволяють значно підвищити ступінь його використання. На підставі аналізу даних щодо вдосконалення форми і конструкції алюмінієвої чушки, шляхом застосування обважнювачів з чавуну і сталі в різних варіантах, обрана і описана технологія отримання біметалічної алюміно-залізної чушки зі зміщеним центром ваги, що дозволить зменшити контактну поверхню взаємодії з атмосферним киснем, тим самим підвищити засвоєння алюмінію. На підставі промислового випробування в умовах ТОВ МЗ «Дніпросталь» при попередньому раскисленні розплаву на випуску з електродугової печі у ковш акцентовано увагу на перевагах застосування фракціонованих комплексних сплавів системи Fe-Al-Si замість вторинного чушкового алюмінію з коефіцієнтом заміни 1:1,25, що дозволило збільшити ступінь використання алюмінію більш ніж на 40%. Описано механізми процесу саморуйнування сплавів системи Fe-Si за аналогією з якими виділені області існування  $\xi$  - фази в потрійній системі Fe-Al-Si і з урахуванням теорії крихкості інтерметалідів запропоновано технологічне рішення щодо стабілізації феросилікоалюмінію від саморуйнування при тривалому зберіганні в будь-яких погодних умовах і широкому діапазоні концентрацій шляхом модифікування сплаву лігатурою на основі рідкісних кольорових металів. Для цих цілей в умовах ТОВ НВП

«Васильківський рудовідновлювальний завод» виплавлено дослідно-промислова партія комплексного алюміно-кременієвого сплаву на залізній основі (Al ~ 30%, Si ~ 15%, Fe-решта) в індукційній печі з застосуванням модифікуючої добавки.

УДК 621.771.25:669.18

## **ВПЛИВ НЕМЕТАЛЕВИХ ВКЛЮЧЕНЬ НА ОБРИВНІСТЬ ПРИ ВОЛОЧІННІ ДРОТУ**

**Т.М. Голубенко, к.т.н., В.А. Луценко, д.т.н.**

**Інститут чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України, м. Дніпро**

На технологічність переробки металу під час волочіння (обривність) впливають різні чинники, основні з яких це нерівномірність структури, присутність бейніто-мартенситних ділянок; підвищення міцності (наклеп); дефекти металургійного та дротяного переділів (не налагоджене обладнання); забруднення сталі неметалевими включеннями (їх склад, геометрія й здатність до деформування). При цьому більше 55% обривів пов'язують із дефектами металургійного переділу, зокрема наявності неметалевих включень у сталі, які перешкоджають пластичній деформації металу й призводять до розшарування дроту з подальшим обривом. Дослідження було спрямоване на виявлення металургійних причин обривності при виробництві дроту малих (1,2...0,8 мм) діаметрів. Основним об'єктом для дослідження послужив сталевий прокат різного діаметру від 5,5 мм до 0,8 мм із низьковуглецевої кремнемарганцевої сталі марок Св-08Г2С і G3Si1 від різних партій, які поставляються згідно з ГОСТ 2246-70 і EN ISO 14341:2008 відповідно. Вміст основних хімічних елементів у складі сталей різних марок (різних партій) наступний: для G3Si1 – 0,077-0,071% С; 0,84-0,71% Si; 1,46-1,56% Mn; для Св-08Г2С – 0,083-0,070% С; 0,71-0,77% Si; 1,94-1,91% Mn. За нормативною документацією вміст неметалевих включень не регламентується. Проведені вимірювання механічних властивостей показали їх задовільні значення та відповідність нормативним показникам. Переробка на дріт різних плавів відбувалася в однакових умовах. Аналіз показав присутність у низьковуглецевій кремнемарганцевій сталі точкових оксидів, сульфідів, а також рядкових оксидів, недеформованих і крихких силікатів, які розташовуються вздовж напрямку деформації. Пластичні сульфіди, виявлені на діаметрі 5,5 мм, в процесі волочіння стоншуються і в дроті діаметром 1,2...0,8 мм не виявляються. Волочіння сталі марки G3Si1 і марки Св-08Г2С (партія 1) проходило без ускладнень. Рівень забрудненості неметалевими включеннями у цих сталях відповідає значенню 0,5...1 бал для точкових та 1...2 бал для рядкових включень. При виробництві дроту зі сталі Св-08Г2С, партія 2, були обриви при переробці на діаметр 0,8 мм. Структура та механічні характеристики сталі при цьому не відрізнялися від сталі, волочіння якої проходило без обривів. Однак виявлено наявність високого рівня забрудненості неметалевими включеннями (рядкові): 3 бал для діаметру 5,5 мм та 5 бал для діаметру 0,8 мм. Волочіння на діаметр 1,2...0,8 мм партій кремнемарганцевих сталей, у яких забруднення вихідної катанки неметалевими включеннями мало 2 бал і менше, проходило без ускладнень. Дослідження показали, що наявність загальної забрудненості неметалевими включеннями більше 2 балу у вихідному низьковуглецевому кремнемарганцевому прокаті діаметром 5,5 мм при подальшому волочіння на дріт малих (1,2...0,8 мм) діаметрів ускладнює виробництво і призводить до обривів металу. Таким чином, забезпечення високої чистоти сталі за неметалевими включеннями, їх контроль, підвищить технологічність виробництва дроту малих діаметрів.



УДК 624.042.5 + 624.042.12

## ТЕОРІЯ ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛУ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТРУБНОЇ ЗАГОТОВКИ

**Кадильникова А.В., аспірант**

**Інститут електрозварювання імені Є. О. Патона, відділ фізико-металургійних проблем електрошлакових технологій**

**Савкин С.В., аспірант**

**Національна металургійна академія України,  
Кафедра якості, стандартизації та сертифікації**

У сучасній літературі зустрічається безліч експериментальних і теоретичних підтверджень раціональності застосування вібраційної обробки в різних металургійних процесах. Згідно з результатами досліджень, процес деформування твердих тіл складається з серії малих періодичних осциляцій і дроблення окремих кристалічних зерен або частин монокристалу. Осцилюючий характер пластичної течії дозволяє розглядати цей процес як автоколивальний. Визначивши власну частоту осциляцій пластичної течії, можна за допомогою резонансного зовнішнього вібраційного впливу викликати штучне підвищення інтенсивності пластичної течії твердого тіла (металу або сплаву), і за рахунок цього домогтися зниження величини зусилля деформації.

Виходячи з основ фізичного процесу кристалізації металу і його сприйняття вібраційних впливів досить близьким до процесу застигання зварного шва є процес кристалізації металу при литві сталевих злитків. Даний процес досить добре вивчений в роботах вітчизняних дослідників. Дослідження формування кристалічних структур модельних і сталевих злитків показали, що вібраційна обробка сталі і сплавів є, по суті, введення в розплав додаткової енергії пружних хвиль. Так як вплив вібрації на кристалізацію металів і сплавів засноване на передачі енергії від джерела поля в рідкий та кристалізуючийся розплав, то цілком резонно, на думку авторів роботи, до опису таких процесів застосувати методи термодинаміки.

Це дало підставу авторам, з позицій термодинаміки, висунути гіпотезу про механізм впливу енергії зовнішніх впливів на металевий розплав: при формуванні кластерних (передзародкових, упорядкованих) структур розплаву, а потім при утворенні і зростанні з них зародків в процесі обробки системи зовнішнім впливом витрата енергії ззовні зростає для більш щільно упакованих структур, які характеризуються типами кристалічних решіток металів.

У роботах вітчизняних авторів наводяться результати досліджень впливу вібрації на кінетику і структуру затвердіння напівбезперервнолитої заготовки. Представлені результати експериментів, які вивчають вплив використання різних частот вібрації і різних місць підведення віброімпульсу на формування структури безперервнолитої заготовки. При певній частоті вібрації відбувається найбільш інтенсивне дроблення зерен, і структура модельного сплаву набуває однорідний вид. Оптимальним місцем підведення віброімпульса є безпосередньо під кристалізатором.

Відносно ж застосування вібрації при знятті залишкових напружень в зварних швах труб знайдені дані тільки про використання її при постобробці виробів, після завершення всіх зварювальних робіт і формування повних залишкових напружень в зварному шві і біляшовній зоні. Сутність даного способу вібраційної обробки зварних конструкцій полягає в застосуванні вібрації до готового виробу, з вже сформованими залишковими напруженнями, протягом певного часу за допомогою спеціальних віброзбудників. Змінні напруги, викликані віброзбудниками, підсумовуються з залишковими напруженнями, при цьому виникає віброползучість металу, яка і призводить до зниження і перерозподілу напружень.

Наведені вище дослідження наочно демонструють перспективність застосування вібраційної обробки металу безпосередньо в процесі зварювання плавленням прямошовної трубної заготовки з метою зняття залишкових напружень в звареному шві та біляшовній зоні.

УДК 669.1.017:621.771.25:669.15-194.53

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЗНОСОСТІЙКИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ ТЕРМІЧНОЇ ТА КОМБІНОВАНИХ ОБРОБОК

А.А. Новіков , К.А. Закатей, керівник, проф. Л.М. Дейнеко

Національна металургійна академія України, Дніпро

З літературних джерел відомо, що найчастіше країни Європи при виготовленні листових карт для бронезилетів використовують сталі типу Hardox, Raex, Fora, Relta, Xar, Domex, Quend, Ruukki, Borox та інші.). Цифрові індекси біля цих марок означають твердість сталі по Бринелю. У країнах СНД виготовляються зносостійкі якісні листові сталі марок 18ХГНМФР, 14ХГ2САФД, 16ХГН2ФБР, 13ХГ2НДФ та інші в товщинах 8,0...50,0 мм (гаряча прокатка, гартування + відпуск). Ці марки сталей є аналогами шведських сталей марок Hardox, Weldox та інші.

При виконанні роботи розглядалися та аналізувалися сучасні листові сталі типу Hardox, Armoх. У таблиці 1 наведені дані про властивості сталей такого типу для різних рівнів міцності. Аналіз технічної та патентної літератури дозволив встановити найбільш високий рівень механічних властивостей, який можливо досягнути в сталевих пластинах, виготовлених з вітчизняних сталей типу ~28-34ХНМФ -  $\geq \sigma_{\text{в}} \sim 1700$  МПа, HRC ~ 52...55,  $\delta_5 \sim 10...12$  %,  $\psi \sim 35...40$  %, KCU ~ 60...80 Дж/см<sup>2</sup> [1]. Для вітчизняної промисловості досягнути такого перспективного рівня механічних властивостей в сталевих пластинах з відносно економно легованих сталей в умовах прокатного виробництва дуже складно (точніше неможливо).

Таблиця 1- Механічні властивості сталей типу Hardox після термодформаційної обробки

Марка сталі	Механічні властивості				
	HB/HRC	$\sigma_m$ , МПа	$\delta$ , %	KC <sup>-40</sup> , Дж	S, мм
Hardox 450 (~0,26%С)	425-475/ 45-49	1100-1300	10	50	3 - 130
Hardox 500 (~0,30%С)	450-540 / 47-55	1250	8-10	50	3 - 130
Hardox 550 (~0,37%С)	525-575 / 54-57	-	-	30	10-50

Примітка: Сталі мікролеговані бором ~0,003...0,005%

Відомо, що один із шляхів забезпечення в броні підвищеного рівня стійкості та живучості - застосування гетерогенної броньовий сталі, яка складається з двох або більше шарів матеріалу, що володіють різною твердістю. Це досягається створенням різного хімічного складу броні по товщині або у результаті диференційованої термічної обробки, наприклад, одностороннього гарту броньових сталевих плит на певну глибину. У деяких випадках гетерогенну броню отримують односторонньою хіміко-термічною обробкою (наприклад, цементацією лицьової поверхні сталевих бронедеталей, що забезпечує високу її твердість - до ~59-60 HRC). При цьому тильні шари броні, що не піддаються спеціальній обробці (цементації), мають підвищений рівень пластичності і в'язкості. Найбільшого поширення набула двошарова броня с лицьовим шаром зі сталі високої твердості (~HRC 60) і тильним шаром (підкладки) з більш м'якою (HRC 53...55) та в'язкою і пластичною сталю. Твердий лицьовий шар металу служить для руйнування наконечника кулі або сердечника бронебійного снаряду (в результаті пластичної деформації), в той час як в'язка підкладка поглинає енергію кулі або снаряду і запобігає розтріскуванню броні при взаємодії.

Гетерогенна броня має помітну перевагу в порівнянні з гомогенної сталевую бронєю за рівнем броне стійкості, а головне, відрізняється більш високою живучістю.

При розробці концепції створення комплексної технології фінішної зміцнюючої обробки катаних листових карт з товщиною 4,5...6 мм для бронезилетів V та VI рівня захисту виходили з доцільності дослідження рівня властивостей гомогенного і гетерогенного металу, тому вченими НМетАУ, ХФТІ ННЦУ та КПІ одночасно передбачено було розробляти три різних технології їх обробки [1]:

– зміцнююча термічна обробка катаних заготовок (для гомогенної броні); – комбінована (хіміко-термічна + зміцнююча термічна) обробка катаних заготовок (для гетерогенної катаної броні);

– комбінована обробка (зміцнююча термічна обробка катаних заготовок + нанесення високоміцного шару матеріалу на поверхню пластини).

Одним з перспективних напрямків отримання високоміцного протикульового броньового листа для жилетів IV та V рівня захисту є поєднання ХТО (азотування) і зміцнюючої термічної обробки. Запропонований вченими ННЦ ХФТІ процес іонного азотування в газовій плазмі вакуумнодугових установках при температурах від ~ 450 до 600 °С дозволяє скоротити час глибокого азотування до годин і товщина поверхні азотованого шару після такої витримки може становить  $\geq 2$  мм. При реалізації такого процесу можливо регулювати фазовий склад карбюризатору, змінюючи співвідношення робочих газів в суміші для досягнення необхідного ефекту, а також можливо позбутися шкідливої дії аміаку, при розкладанні якого виділяється водень та провокує підвищення крихкості сталей [2].

В зв'язку з тим, що при виробництві легкої броні потрібно отримувати високий рівень міцності і твердості в металі, що неможливо у разі використання технологічної схеми: гартування + високий відпуск (або поєданого відпуску з пічним азотуванням). Тому у роботі [3] було запропоновано використовувати нетрадиційне рішення – з початку листовому металу надати ХТО (глибоке азотування- до 2...3 мм лицьової поверхні пластини), а потім пластини загартувати по режимам ефективної термічної обробки з подальшим низьким відпуском. Подальші обробки можуть здійснюватися з використанням однієї з вище вказаних схем.

#### **Література:**

1. Розробка параметрів комплексної технології обробки основних жорстких елементів протикульових бронезилетів / Дейнеко Л.М., Лобода П.І., Андреев А.О., Столбовий В.О. та інш. Науковий та інформаційний журнал «Металознавство та термічна обробка металів», Дніпро, 2019, № 3(86).-С.37-43 ISSN 2413-7405

2. А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев и др. «Вакуумно-дуговые устройства и покрытия».- Харьков: ННЦ ХФТИ, 2005г. – 236с.

3. Andreyev A.O., Jirov O.S., Sobol' O.V., Stolboviy V.O. and oth. Patent Ukraїni 117008U C23C 1432 na korisnu model. Sposib himiko-termichnoї obrobki stalevih virobiv [Method of chemical and thermal treatment of steel products. Byul. no. 11 from 12.06.2017, 2017

### **ПРО ОСОБЛИВОСТІ ВПЛИВУ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ РЕГУЛЬОВАНОВОГО ОХОЛОДЖЕННЯ НА ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БУНТОВОГО ПРОКАТУ ЗІ СТАЛІ ПЕРЛІТНОГО КЛАСУ**

**кер. Е.В. Парусов к.т.н., І.М. Чуйко к.т.н., О.В. Парусов к.т.н.**

**Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАНУ, м. Дніпро**

Впроваджено у промисловість нову прогресивну технологія деформаційно-термічного оброблення (ДТО) бунтового прокату діаметром 8,0...16,0 мм зі сталі перлітного класу С86D<sup>B</sup>, призначеного для виготовлення за енергоефективною схемою високоміцних металовиробів (холоднодеформована й дротяна арматура, арматурні канати), які використовують для будівництва різноманітних споруд (вантові мости, віадуки, магістралі, оболонки локалізуючої системи безпеки АЕС, залізничні шпали, монолітні балки перекриттів тощо).

Розроблений високотемпературний режим ДТО бунтового прокату зі сталі С86D<sup>B</sup> в лінії безперервного дрібносоротно-дротового стана 320/150 базується на наступних технологічних параметрах: температура прокату перед дротовим блоком –  $(980 \pm 10)$  °С; температура прокату на виході з останньої кліти дротового блоку –  $(1040 \pm 10)$  °С; охолодження водою не застосовується; тривалість післядеформаційної паузи – до 9,0 с; тристадійне повітряне охолодження прокату від температур  $((A_1 + 310) \pm 10)$  °С: перша стадія – зі швидкістю  $19,7 \dots 5,0 \cdot (F \div P)$ , °С/с до температур, на  $15 \dots 20$  °С нижчих за температуру початку перлітного перетворення, друга стадія – витримування під теплоізолювальними кришками транспортеру до 12,0 с, третя стадія – зі швидкістю  $3,7 \dots 1,7 \cdot (F \div P)$  до температур  $220 \dots 200$  °С (де  $F$  – площа поперечного перерізу прокату, мм<sup>2</sup>;  $P$  – периметр профілю прокату, мм). Охолодження бунтового прокату у відповідності до зазначеного температурно-швидкісного регламенту забезпечує контрольоване зростання аустенітного зерна сталі та, відповідно, стійкості аустеніту перед початком повітряного охолодження, що в подальшому забезпечує утворення більшої кількості дрібнодисперсного перліту.

Показники якості прокату зі сталі С86D<sup>B</sup> у порівнянні зі стандартною (існуючою) технологією виготовлення змінюються наступним чином: глибина знеуглецювання поверхні зменшується до 0,49 %; кількість перліту бала № 1 зростає до 87 %; середня міжпластинкова відстань у перліті зменшується на 23 %; тимчасовий опір руйнуванню, відносні звуження і видовження зростають до 1205 МПа, 32,0 % і 11,5 % відповідно. За даними фрактографічних досліджень збільшення величини аустенітного зерна сталі С86D<sup>B</sup> перед початком розпаду аустеніту у міжкритичному інтервалі швидкостей безперервного охолодження не призводить до зменшення показника ударної в'язкості. У разі контрольованого зростання середнього розміру аустенітного зерна від 13,8 мкм до 25,7 мкм і наступного прискореного повітряного охолодження показник  $KCU_{20}$  збільшено на ~ 17 % від 23,34 Дж/см<sup>2</sup> до 27,28 Дж/см<sup>2</sup>.

Підвищення температури початку охолодження (на  $100 \dots 140$  °С) від температур, які традиційно використовують на практиці, а також збільшення тривалості післядеформаційної витримки бунтового прокату зі сталі С86D<sup>B</sup> дозволило поліпшити рівномірність розподілу структури за поперечним перерізом, істотно зменшити глибину знеуглецювання поверхні, підвищити вихідну міцність і пластичність, що обумовило можливість використання енергоефективної схеми прямого волочіння (без застосування патентування) під час виготовлення холоднодеформованих високоміцних металовиробів (дротяна арматура 5,0Вр1400-Р1, 6,0Вр1400-Р1; арматурний прокат Ø 9,6 мм; переробна заготовка 5,0В1500-Р1 для арматурних канатів захисних оболонок огородження АЕС; семидротяні арматурні канати Ø 9,3; 12,5 і 15,2 мм).

За досягнутими показниками якості прокат зі сталі С86D<sup>B</sup> відповідає вимогам стандарту EN ISO 16120:2011, частина № 4 «Особливі вимоги до прокату спеціального призначення». За результатами промислових випробувань розроблено сучасний нормативний документ – технічну угоду ТС 001-1103-2015 на виготовлення бунтового прокату для високоміцних арматурних канатів і холоднодеформованої арматури.

## ПРОГРЕСИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ МЕТАЛУ ТИСКОМ

УДК 621.771.23:620.17.001.894.5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ЗНАКОЗМІННОГО ВИГИНУ СМУГИ НА ЗМІНУ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ І МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ

К.Ю. Ключніков, О.І. Лещенко, В.Г. Раздобреєв к.т.н., Д.Г. Паламар

Інститут чорної металургії НАН України, м. Дніпро

В даний час активно вивчаються способи пластичної деформації, які пов'язані з впливом на розкат різних комбінованих впливів. При цьому, за рахунок формування складного напружено-деформованого стану в розкаті, відбувається трансформація структури металу, що може призводити до його знеміцнення. Дослідження такого способу знеміцнюючої обробки холоднодеформованого розкату, що не пов'язаного з термічною обробкою, особливо актуально для технологічних процесів виробництва профілів стрічкового типу волочінням в роликівих волоках з відношенням сторін  $b/h > 20$ . Так, при відпрацюванні технології виробництва стрічкового профілю  $0,5 \times 12,0$  мм із дроту діаметром 6 мм, отриманий профіль з необхідною точністю розмірів без застосування проміжної знеміцнюючої термічної обробки. При цьому, запас пластичності металу практично вичерпався. Для дослідження впливу параметрів знакозмінного вигину профілю на зміну деформаційних параметрів і механічних властивостей металу, було виконано експериментальне волочіння профілів стрічкового типу в роликівого волоку, поєднаного з протяжкою профілю крізь рихтувальний пристрій. Аналіз експериментальних даних показав, що після деформації заготовки круглого перетину в роликівого волоку і подальшого протягування отриманого профілю крізь ролики рихтувального пристрою, спостерігалася зміна його геометричних розмірів і механічних властивостей. Залежно від величини перегину роликів рихтувального пристрою, спостерігається утягування профілю з досягненням витяжки  $\lambda = 1,25$ , а механічні властивості металу змінювалися в діапазоні 1,5-7,3 %. Результати досліджень дозволяють приступити до розробки суміщеного процесу волочіння в роликівих волоках-протягування профілю крізь рихтувальний пристрій для підвищення ефективності виробництва профілів стрічкового типу волочінням в роликівих волоках.

УДК 681.5.003.2: [669.018.255:539.374]

### УМОВИ ВИНИКНЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ І АВТОКОЛИВАЛЬНИХ ПРОЦЕСІВ ТА ШЛЯХИ ЇХ СТАБІЛІЗАЦІЇ В ЗАГОТОВЦІ ПРИ ОБРОБЦІ МЕТАЛІВ ТИСКОМ

Ю.А Малиновський<sup>1</sup>, к.т.н., В.П. Лялюк<sup>1</sup>, д.т.н., С.Л. Цвиркун<sup>2</sup>, к.т.н., Д.П. Власенков<sup>2</sup>, С.Ю. Даценко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Учбово-науковий технологічний інститут ДУЕТ, м. Кривий Ріг

<sup>2</sup>ОСП Криворізьський коледж НАУ, м. Кривий Ріг

Однією з причин зниження якості деталей на обкатних, волочильних і інших машинах є нелінійне тертя між інструментом і оброблюваною деталлю, що приводить до виникнення автоколивань і параметричних коливань в поверхневих шарах заготовки, і, як наслідок, до місцевої втрати стійкості в тонких зовнішніх шарах заготовки з подальшим їх руйнуванням. Виявлено режими експлуатації машин для обробки виробів методами пластичного деформування, при яких можуть виникнути шорсткості, що не регламентуються, тріщинуватість і лушення оброблюваних виробів, а також значні динамічні складові при

навантаженні інструменту, приводних і силових механізмів. Обґрунтовано практичні рекомендації щодо поліпшення експлуатаційних якостей виробів і зниження віброактивності машин по обробці металів тиском.

УДК: 621.772.1/2:620.172

## **СИНЕРГЕТИЧНИЙ ВПЛИВ АКТИВНОЇ І ЦИКЛІЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ ХОЛОДНОДЕФОРМОВАНОЇ ЗАГОТОВКИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АРМАТУРИ І КРІПИЛЬНИХ ВИРОБІВ**

**Г.І. Перчун, к.т.н., О.В. Івченко, к.т.н., В.С. Чмельова, к.т.н., П.В. Кондратенко, к.т.н.**

**Національна металургійна академія України, м. Дніпро**

На основі принципів синергетики розглянуті питання щодо використання у технології виробництва холоднодеформованих виробів з низьковуглецевих нелегованих сталей різноманітних комбінацій активної і циклічної деформації, що дозволяє одночасно підвищити рівень міцності заготовки та її пластичність і робить можливим без перешкод формувати якісну готову продукцію. Метою дослідження в даній статті була оцінка впливу технологічних параметрів активної та циклічної деформації на службові характеристики промислових зразків холоднодеформованої заготовки для виробництва арматури та кріпильних виробів.

Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що наступна за активною холодною деформацією заготовки для виготовлення болтів та холоднодеформованої арматури деформація знакозмінним вигином призводить до суттєвого зниження межі плинності і межі міцності та підвищення характеристик деформативності (пластичності). Для холоднодеформованої заготовки під болти класу 8.8 після волочіння достатньо провести один цикл деформації знакозмінним вигином при ступені попередньої активної деформації волочінням не менш ніж 50%, що дозволить забезпечити необхідний рівень міцності (600 МПа) та підвищить пластичність в 1,5-2,0 рази. У цьому технологічному процесі холодна активна деформація і циклічна деформація синергетично об'єднані для отримання заданого комплексу експлуатаційних властивостей.

Окрім цього, холодна деформація і операція остаточної обробки поверхні виробу використані не тільки для отримання необхідних розмірів і рельєфу поверхні, але і для зміни структурного стану і, відповідно, властивостей виробів, що з точки зору синергетики дозволяє істотно економити енергію.

Розроблені технологічні схеми отримання виробів з низьковуглецевих нелегованих сталей, що зміцнюються холодною деформацією, та використання різноманітних комбінацій активної і циклічної деформації, які дозволяють одночасно підвищити рівень міцності заготовки та її пластичність, робить можливим без перешкод формувати якісну готову продукцію.