

## **РЕЦЕНЗІЯ**

на дисертаційну роботу Арендач Наталії Анатоліївни  
«Розробка технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному  
ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю»,  
представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за  
спеціальністю 136 - «Металургія»

### **Оцінка структури змісту дисертації**

Дисертаційна робота Арендач Наталії Анатоліївни складається зі вступу та основної частини з п'яти розділів з висновком до кожного з них, також загальних висновків, переліку використаних джерел, який налічує 134 найменувань публікацій закордонних і вітчизняних авторів та викладений на 14 сторінках і одного додатку. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 153 сторінках машинописного тексту, з яких 122 сторінок основного тексту, містить 93 рисунка, 9 таблиць.

Структура роботи по складу та послідовності розділів логічна та відповідає вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами, сформульовано її мету і задачі досліджень, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, а також відомості щодо особистого внеску здобувача, апробацію отриманих результатів, представлені дані щодо структури та обсягу дисертації.

У **першому розділі** «Огляд сучасних технологічних рішень що до виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю» виконано аналітичний огляд стану питання, обґрунтовано вибір напрямку досліджень та сформульовано завдання своєї роботи.

Автором за результатами комплексного дослідження проведеного за актуальними джерелами науково-технічної інформації встановлено, що використання технологій з виплавки сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % у

кисневих конвертерах з подачею нейтрального газу з низу, а основного кисню зверху використовується на сучасних металургійних підприємствах, проте супроводжується зниженням виходу придатного рідкої сталі у порівнянні з виробництвом сталей вуглецевого сортаменту. Це зумовлено фізико-хімічними особливостями процесу окислення вуглецю, зокрема його переходом з кінетичної ділянки у дифузійну і як наслідок необхідністю додаткової інтенсифікації масообмінних процесів в металевій ванні. Що стосується технологій газо-кисневого рафінування, то вона базується на подаванні технологічних газів у нижню частини сталеплавильного агрегату, зокрема через дно для ГКР процесу та з бокової сторони ванни – для AOD.

Показано, що технологія газокисневого рафінування передбачає чергування продувки металеві ванни киснем та нейтральним газом, що забезпечує уникнення переокислення металу та відповідно досягнення високого рівня виходу придатного рідкої сталі. Використання методів окислювальної продувки на етапі вакуумування сталі є найбільш ефективним методом зниження вмісту вуглецю нижче концентрації 0,1%. Це зумовлено саме значним впливом зовнішнього тиску на процеси окислення (моноксид вуглецю є газоподібною речовиною). Суттєвим недоліком процесів видалення вуглецю з металевих розплавів нижче 0,1 %, що базуються на процесах газо-кисневого рафінування є використання спеціального технологічного обладнання встановлення якого потребує значних капіталовкладень. Що стосується процесів окислення вуглецю киснем при пониженому тиску, то вони масово не застосовуються через невелику стійкість вузлів підводу кисню у розплав. Відмічено, що за для проведення позапічної обробки металевих розплавів у ковші раціонально проводити продувку інертним газом – аргоном, який забезпечить усереднення розплаву із одночасним видаленням газів та неметалевих включень. Таку продувку краще проводити крізь донні продувні пристрої у бульбашковому режимі, що забезпечить якісне перемішування ванни. Крім того, вказаний спосіб обробки розплаву можна вдосконалити шляхом заміни інертного газу на суміш інертний газ – кисень задля забезпечення додаткового зневуглицювання металевих розплавів до



необхідних низьких концентрації без застосування вартісного обладнання, як, наприклад, за умов вакуумування. Зроблено висновок, що виходячи з проведеного огляду найбільш актуальним завданням в контексті вдосконалення технологічних процесів з виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % є винесення операції з видалення вуглецю нижче вказаної концентрації в окрему технологічну операцію, що виконується на етапі позапічної обробки сталі.

У другому розділі «Термодинамічна оцінка можливості перебігу реакцій при донному продуванні металу в ковші» розглянуті переваги термодинамічного аналізу металургійних процесів за показником вільної енергії Гіббса, виконано аналіз можливості протікання реакції за участю кисню на межі фаз, що взаємодіють між собою у стальковші, а також виконано дослідження впливу гідростатичного тиску у ковші на показник вільної енергії Гіббса реакцій між різними фазами. Зроблено висновки щодо перебігу можливих реакцій у розплавленому об'ємі сталі при продуванні газоподібним киснем, показано, що умови складаються у зоні «газова бульбашка – метал» для реакцій. Наступний висновок свідчить, що при продувці розплаву сталі через днище у бульбашковому режимі, газовою сумішшю, що містить у своєму складі кисень, завдяки впливу гідростатичного тиску розплаву активніше протікатимуть реакції окислення за участю газоподібного кисню.

У третьому розділі «Вдосконалення конструкції донного продувного блоку для забезпечення продувки сумішшю газів, що містить кисень» з метою визначення впливу конструктивних параметрів донного продувного блоку на ефективність масообмінних процесів в ванні сталерозливного ковша було проведено визначення основних параметрів, що впливають на даний процес. У якості цільової функції, що визначає ефективність масообмінних процесів в об'ємі розплаву сталерозливного ковша прийнято час гомогенізації, а також з метою визначення масштабу моделювання були визначені основні критерії подоби, що описують процес перемішування розплаву у ковші під дією продувки нейтральним газом. В ході виконання досліджень на даного розділу встановлені особливості низькотемпературного фізичного моделювання



процесу продувки нейтральним газом металевого розплаву через донні продувні блоки різного типу. Відмічено, що найбільш ефективною конструкцією бульбашкоутворювача в складі донного пристрою для продування розплавів є використання матеріалів неорієнтованої пористості або щилинних бульбашко утворювачів з розміром шпарин 1 – 2 мм. Їх використання дозволяє отримати стабільний стовп дрібних бульбашок, за рахунок чого час гомогенізації скорочується. В ході проведення стендових досліджень встановлено, що для проведення операції знеуглецювання розплаву за рахунок продувки крізь донні продувні блоки сумішшю технологічних газів у стальковші необхідно в конструкцію донного продувного блоку ввести камеру попереднього змішування технологічних газів. Відповідно до емпірично отриманих результатів канали для ведення різних продувних газів в камеру повинні знаходитися під кутом до вертикальної вісі в межах 25- 40° що забезпечить повне змішування струменів газу з мінімальною втратою швидкості (встановлено за результатами тіньової зйомки за рахунок виявлення геометричних обрисів струменів та відсутності на них ділянок з різною щільністю – відрізняються за інтенсивністю кольора).

У четвертому розділі «Дослідження особливостей перемішування рідкої ванни при донній бульбашковій продувці за різних параметрів дуття» з використанням методики виконані дослідження на експериментальній установці щодо встановлення раціональних режимів продувки крізь донний бульбашкоутворювач з ненаправленою пористістю. Проведені дослідження на натурній холодній моделі сталерозливного ковша щодо впливу режимів продувки ванни сталерозливного ковша на особливості гомогенізації ванни за рахунок розчинення «важких» присадок речовин при продуванні крізь донну фурму за бульбашковим режимом показали, що під час продувки крізь блок з ненаправленою пористістю формується потік бульбашок, який не тільки підіймається вгору під дією сил Архімеда, але й створює додатковий рух середовища в прилеглих до потоку бульбашок шарах ванни; під час продувки у бульбашковому режимі найбільша зміна концентрації за час продувки відбувається в серединному об'ємі ванни ковша; найкращі умови



перемішування ванни та найкоротший час її гомогенізації створюються при продуванні з інтенсивністю подачі продувного газу  $0,684-1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі год}$ ; - найкращі умови щодо коливання рідкої ванни, які не повинні утворювати ділянки оголеного металу під час продувки створюються при інтенсивності введення продувного газу  $0,684-1,026 \text{ м}^3/\text{т сталі}\cdot\text{год}$ ; - за відведений при проведенні досліджень час продувки заплановану концентрацію розчину 1% було досягнуто при інтенсивності введення у ванну газу  $1,026-1,368 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі год}$ , при більш швидкому досягненні «гомогенного» стану рідкої ванни при інтенсивності подачі газу  $1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі год}$ . Тобто рекомендацією для продування ванни у сталерозливному ковші крізь донний блок з ненаправленою пористістю у бульбашковому режимі для досягнення швидкого гомогенного стану при додаванні «важких» присадок є продувка з інтенсивністю введення газу на рівні  $0,36 \text{ м}^3/\text{т сталі}\cdot\text{год}$  (при перерахуванні на реальний промисловий об'єкт – сталерозливний ківш ємністю 250 т). Крім того відповідно до даних наведених у літературних джерелах, при зазначених витратах спостерігається збільшення зони контакту металевої ванни на рівні 3-5%, що є прийнятним для промислових умов.

У п'ятому розділі «Високотемпературне дослідження можливості окислення вуглецю при донному бульбашковому продуванні залізовуглецевого розплаву сумішшю кисень – інертний газ» з метою оцінки можливості окислення вуглецю при його невеликій кількості у розплаві за умов донного продування сумішшю газів, що містить кисень, у бульбашковому режимі було проведено високотемпературне фізичне дослідження. Основою моделі була 1 кг індукційна піч. Донну бульбашкову продувку змодельовали шляхом використання алундової трубки, яка відтворювала одиничний канал пористого донного блоку. Проведено високотемпературне фізичне моделювання продувки залізовуглецевого розплаву з невеликим вмістом вуглецю ( $0,3\%\text{мас}$ ) сумішшю кисень – нейтральний газ через одинарний продувний канал, що імітує бульбашковий режим продувки. Встановлено, що раціональним з точки зору окислення вуглецю та експлуатації продувних пристроїв є вміст у газовій суміші кисню

20-30%. При цьому процес окислення відбувається зі швидкістю 0,056%/мас/хв.

У загальних висновках дисертації викладено найбільш важливі наукові та практичні результати, що були отримані в дисертаційній роботі і сприяли розв'язанню сформульованого науково-прикладного завдання.

**Перелік посилань**, які були використані здобувачем в аналітичному огляді завдання, достатньо повно охоплює зазначену галузь знань та відображає основні напрями розвитку досліджень та технології виробництва сталі.

**Оцінка оформлення, мови і стилю дисертації.** Матеріали дисертації викладені послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо дисертацій на присвоєння вченого звання доктора філософії. Мова і стиль дисертації забезпечують доступність сприйняття викладених матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертація написана та оформлена відповідно до вимог щодо дисертацій доктора філософії.

### **Наукові результати дисертації**

1. Отримали подальшого розвитку уявлення що до перебігу окислювальних реакцій в багатокомпонентних залізовуглецевих сплавах за рахунок кисеньвмісної газової фази та тиску на процеси окислення вуглецю на етапі позапічної обробки сталі. Встановлено, що вірогідність протікання реакції розчинення кисню у розплаві та окислення вуглецю до CO збільшується на 19%відн. при збільшенні тиску у 34 рази за рахунок гідростатичного впливу шару металу та шлаку для сталерозливного ковша ємністю 250 т.

2. За результатами фізичного моделювання при використанні методу тіньової зйомки вперше встановлено, що при взаємодії газових потоків, які витікають з однаковими газодинамічними характеристиками в порожнину камери змішування під кутом 25-40° до вертикальної вісі камери, відбувається повне їх змішування без втрати швидкості потоку суміші газів.



3. Для промислових умов обробки сталі у ковші ємністю 250-т за результатами низькотемпературного моделювання (рідина, що імітує сталь - вода), встановлено гідродинамічні особливості гомогенізації рідини в сталерозливному ковші при донній продувці сумішню системи «кисень-нейтральний газ». Вперше встановлено, що за інтенсивності  $1 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{год}$  (за умов збільшення витрати продувного газу на 20% у порівнянні зі стандартною технологією) відбувається утворення тангенціальних потоків, які пульсують й залучають більшу частину ванни ( $\sim$  на 52%) до перемішування та  $\sim$  на 42% скорочується тривалість усереднення хімічного складу рідини при додаванні у якості імітатора добавки, що розчиняється, хлориду натрію.

4. За результатами лабораторного високотемпературного моделювання вперше встановлено, що за умов продувки металевого розплаву з вмістом вуглецю 0,3%мас. сумішню системи «кисень-нейтральний газ» при вмісті кисню 20-30% спостерігається пріоритетне окислення вуглецю зі швидкістю 0,056 %мас/хв з досягненням його кінцевого вмісту 0,01% з мінімальним окисленням інших домішок у розплаві.

### **Практичні результати дисертації**

1. Встановлено, що раціональна форма бульбашкоутворювача донного продувного блоку містить ненаправлену пористість або щілинні отвори з відстанню між щілинами 1,0-1,5 мм, при цьому час гомогенізації металеві ванни скорочується на 42% у порівнянні з використанням каналної пористості.

2. Розроблено авторську методику електрокондуктометричного дослідження стосовно перерозподілу домішок в об'ємі металеві ванни сталерозливного ковша, яка підвищує інформативність щодо ефективності впливу режиму перемішування ванни на розподіл домішок за об'ємом всієї ванни.

3. Запропоновано конструкцію донного продувного блоку для продувки залізовуглецевого розплаву газовою сумішню системи «кисень-нейтральний газ», яка складається із бульбашкоутворювача, камери для змішування газів та каналів для підведення газів. Запропонована конструкція захищена патентом України № 126453 «Вогнетривкий блок для продувки металу газами».

4. Розроблено рекомендації використання у промислових умовах технології донної продувки рідкого розплаву у сталерозливному ковші при позапічній обробці сумішшю газів системи «кисень-нейтральний газ» (вміст кисню 20-30%, загальна витрата газової суміші 0,25-0,29 м<sup>3</sup>/т·год), які забезпечують отримання сталі з вмістом вуглецю до 0,01%.

**Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.** Основний зміст дисертації опубліковано в 15 наукових працях в тому числі: у 5 фахових виданнях; у 1 патенті України на корисну модель; у 9 тезах доповідей на міжнародних та всеукраїнських науково-технічних та науково-практичних конференціях, одна з яких проходила за кордоном. Зауваження по дисертаційній роботі.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. В анотації дисертаційної роботи приведені аббревіатури – ГКР, AOD без розшифровки, доцільно при першому згадуванні приводити розшифровку.

2. У таблиці 2.2 для кращого візуального сприйняття доцільно змінити розрядність даних тиску з Па на кПа.

3. У таблиці 4.2 наведені дані, які отримані за допомогою програми CarelDraw, доцільно привести методику оцінки частини ванни, що є потоком бульбашок з використанням програми CarelDraw.

4. При опису рисунка 5.3 висновок про кращий варіант продувки ґрунтується на візуальному оцінюванні, доцільно вказати критерій, за яким зроблено висновок.

5. На рисунку 5.7 приведено зниження вмісту вуглецю за час продувки при різних частках кисню, а саме 5%, 30%, 50%, але в описі методики згадується, що продувний газ складається із суміші кисню та азоту у пропорції 10%х90%, 30%х70%, 50%х50%.

Однак, зроблені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертації.

#### **Відповідність змісту дисертації спеціальності**

Дисертаційна робота Арендач Н.А. «Розробка технологічних засад



окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю» при використанні графітованого порожнистого електрода» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 136 - «Металургія».

### **Загальний висновок та оцінка роботи**

Дисертаційна робота Арендач Н.А. «Розробка технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю» є завершеним науково - прикладним дослідженням, виконаним на високому науковому рівні та відповідає вимогам, передбаченим «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022р.), положенням Вимог до оформлення дисертації (затверджених наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017р.), а здобувач **Арендач Наталя Анатоліївна** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 - «Металургія».

Офіційний рецензент:

завідувач відділу позапічної обробки чавуну

Інститута чорної металургії ім.З.І.Некрасова

НАН України, кандидат технічних наук

Володимир КИСЛЯКОВ

Підпис к.т.н. Кислякова В.Г. ЗАСВІДЧУЮ  
вчений секретар ІЧМ НАНУ, к.т.н.



Лариса ГАРМАШ