

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Арендач Наталі Анатоліївни  
«РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ ПРОДУВКИ В  
СТАЛЕРОЗЛИВНОМУ КОВШІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ З НИЗЬКИМ  
ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ»

представленої на здобуття наукового ступеня  
доктор філософії за фахом 136 – «Металургія»

**Актуальність роботи**

В сучасному машинобудуванні особливе місце займають сталі з вмістом вуглецю менше 0,1 %мас, що обумовлено особливими експлуатаційними властивостями: високою пластичністю, високим ступенем деформації у холодному стані та необхідними показниками жорсткості та міцності. Основне їх призначення це виготовлення деталей за рахунок штампування у холодному стані (виготовлення кузовів автомобілів та інших транспортних засобів). При цьому вони забезпечують необхідні показники жорсткості та міцності деталей при меншій металоємності.

Традиційними методами виробництва зазначеного класу сталей є використання технології газо-кисневого рафінування на етапі виплавки (AOD, ГКР), використання окислювальної продувки при зниженому тиску або комбінування зазначених вище технологічних процесів. Що стосується операції газо-кисневого рафінування, їх здійснення потребує залучення технологічного устаткування спеціальної конструкції та значних змін в технологічному режимі ведення плавки. при цьому у вітчизняній виробничій базі є три підприємства з реалізацією технології ГКР на конвертерах малої ємності. Що стосується технологічних рішень по окисленню домішок металевої ванни при зниженому тиску, вони можуть бути реалізовані з використанням конвертерів циркуляційного та камерного типів. Враховуючи що на вітчизняних підприємствах, які працюють за умов воєнного стану, ділянки вакуумування металу представлені вакууматорами камерного типу (два підприємства), реалізація зазначеної технології є вкрай складною. Таким чином пошук альтернативних технічних рішень щодо виробництва сталей з вмістом вуглецю менше 0,1 %мас є актуальним завданням для вітчизняної металургійної науки на сучасному етапі.

В дисертаційній роботі автором запропоновано технологічне рішення щодо виробництва сталей з вмістом вуглецю менше 0,1 % мас яке передбачає виплавку залізовуглецевого напівпродукту у кисневому конвертері з вмістом вуглецю 0,3 %мас та подальшу його декарбонізацію у сталерозливному ковші на етапі позапічної обробки сталі за рахунок продувки сумішшю технологічних газів системи «кисень- нейтральний газ» через донний продувний блок. Зазначене технічне рішення є актуальним для вітчизняних металургійних підприємств, які працюють в умовах суворого обмеження ресурсів оскільки дозволить при мінімальних витратах розширити асортимент сталей, що випускається, та забезпечити виробництво сталей з низьким вмістом вуглецю у високих об'ємах.

### **Оцінка структури та змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається із вступу та основної частини, яка містить 5 розділів, загальних висновків та узагальненого переліку літературних джерел і додатку. Загальний зміст дисертаційної роботи викладено на 153 сторінках машинописного тексту. Містить 93 рисунки та 9 таблиць, 1 додаток. Загальний список використаних джерел містить 134 посилання.

**У вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, надана інформація щодо зв'язку роботи з науковими програмами, сформульовано її мету та завдання досліджень, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів, а також відомості щодо особистого внеску автора, апробація отриманих результатів. Представлені данні щодо структури та обсягу дисертації.

**У першому розділі** «Огляд сучасних технологічних рішень що до виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю» приведено результати дослідження за джерелами науково-технічної інформації, які дозволили встановити, 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 низкою технологічних проблем, зокрема зниженням виходу придатного 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.

Автором відзначено, що технологія газо-кисневого рафінування базується на подаванні технологічних газів з нижньої частини сталеплавильного агрегату, зокрема через дно для ГКР процесу та з бокової сторони ванни – для AOD. При цьому використовуються фурми спеціальної конструкції «труба у трубі», які забезпечують введення кисню у металеву ванну в оболонці з палива, виключаючи високотемпературний вплив зони окислення на футерівку. При цьому технологія газокисневого рафінування передбачає чергування продувки металеві ванни киснем та нейтральним газом або їх сумішшю, що забезпечує уникнення переокислення металу та відповідно забезпечення високого рівня виходу придатного рідкої сталі.

Відповідно до тексту дисертаційної роботи наведено відомості, що використання методів окислювальної продувки на етапі вакуумування сталі є найбільш ефективним методом зниження вмісту вуглецю нижче концентрації 0,1 %. Це зумовлено значним впливом зовнішнього тиску на процеси окислення виходячи з агрегатного стану оксидів вуглецю.

Відповідно до проведеного аналізу літературних джерел встановлено, що суттєвим недоліком процесів видалення вуглецю з металевого розплаву нижче 0,1 %, які базуються на процесах газо-кисневого рафінування, є використання спеціального технологічного обладнання, встановлення якого потребує значних капіталовкладень. Встановлено, що особливістю процесів окислення вуглецю

киснем при пониженому тиску є невелика стійкість вузлів підводу кисню у розплав.

Виходячи з ґрунтованого аналізу літературних джерел автором дисертаційної роботи відмічено, що задля проведення позапічної обробки металевого розплаву 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 металевого розплаву до необхідних низьких концентрації без застосування вартісного обладнання, як, наприклад, за умов вакуумування.

**У другому розділі** «Термодинамічна оцінка можливості перебігу реакцій при донному продуванні металу в ковші» проведено оцінювання способу доведення сталі після випуску у ківш шляхом окислювальної продувки через днище сумішню нейтрального газу та кисню з точки зору термодинамічного показника перебігу реакцій. Аналіз проведено за трьома можливими зонами перебігу реакцій: метал – газова бульбашка, метал – шлак, шлак – газова бульбашка, з урахуванням впливу гідростатичного тиску ванни на них та для різних рівнів занурення у металеву ванну для урахування впливу зміни гідростатичного тиску на перебіг реакцій. Підтверджено, що збільшення гідростатичного тиску при зануренні у ванну сприяє перебігу реакцій, за результатами яких кількість газу, що утворюється, менша, ніж та, що бере участь у реакції. Встановлено, що при продуванні крізь днище сумішню газів, яка містить кисень, зі збільшенням глибини ванни спостерігається активізація реакції розчинення газоподібного кисню у розплаві, підвищується можливість перебігу реакцій окислення фосфору, кремнію, марганцю та вуглецю з утворенням  $\text{CO}_2$ .

**У третьому розділі** «Вдосконалення конструкції донного продувного блоку для забезпечення продувки сумішню газів, що містить кисень» представлено 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. Їх використання дозволяє отримати стабільний стовп дрібних бульбашок, за рахунок чого час гомогенізації скорочується на 14 %.

Автором проведені стендові дослідження операції продувки імітації розплаву крізь донні продувні блоки сумішню технологічних газів у стальковші та зроблено висновок про необхідність введення в конструкцію донного продувного блоку камери попереднього змішування технологічних газів. Встановлено, що канали для ведення різних продувних газів в камеру повинні знаходитися під кутом до вертикальної вісі в межах 25- 40°, а камера – змішувач повинна мати відношення висоти до діаметру 1:1.

У четвертому розділі «Дослідження особливостей перемішування рідкої ванни при донній бульбашко вий продувці за різних параметрів дуття» наведені результати дослідження на холодній моделі сталеплавильного ковша щодо розчинення «важких» добавок речовин під час продування через донну пробку в режимі барботажу, які показали наступне:

- при продувці крізь донний блок з ненаправленою пористістю утворювався потік бульбашок, який піднімався вгору під дією архімедових сил і додатково створював рух навколишнього середовища в прилеглих до потоку бульбашок шарах ванни;
- при продувці в барботажному режимі найбільша зміна концентрації відбулася в середньому об'ємі ванни ковша;
- найкращі умови для перемішування ванни та найкоротший час її «гомогенізації» створені при продувці з інтенсивністю подачі газу  $0,684 - 1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ ;
- найкращі умови щодо коливання рідкої ванни, яка не повинна утворювати великих відкритих ділянок на поверхні ванни під час продування, створювалися при інтенсивності продувального газу  $0,684 - 1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ ;

Результати досліджень, наведені автором, враховуючи критерії подібності, дозволили передбачити, що раціональні умови продувки забезпечуються витратою газу  $0,684 - 1,026 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$  при перерахунку на промисловий сталерозливний ківш ємністю 250 т складають  $0,24 - 0,36 \text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$ .

У п'ятому розділі «Високотемпературне дослідження можливості окислення вуглецю при донному бульбашковому продуванні залізовуглецевого розплаву сумішшю кисень – інертний газ» представлені результати високотемпературного дослідження продувки залізовуглецевого розплаву з невеликим вмістом вуглецю (0,3%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  $0,056\% \text{ мас}/\text{хв}$ .

У загальних висновках дисертаційної роботи викладено найбільш важливі наукові та практичні результати, які були отримані в процесі виконання дисертаційного дослідження. Вони сприяли розв'язанню сформульованого актуального науково-практичного завдання.

Список джерел, які були використані в аналітичному огляді при аналізі і результатів експериментальних досліджень, в достатній мара охоплює зазначену галузь знань та відображає основні напрямки розвитку досліджень і технології виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю.

Матеріали дисертаційної роботи виконані послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо дисертаційних робіт на присвоєння вченого звання доктора філософії. Мова і стиль дисертаційної роботи забезпечують доступність сприйняття викладених матеріалів, наукових положень, висновків і рекомендацій.

### 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 СО збільшується на 19% відн. при збільшенні тиску у 34 рази за рахунок гідростатичного впливу шару металу та шлаку для сталерозливного ковша ємністю 250 т.

Термодинамічні дослідження процесів окислення складових домішок багатокомпонентних залізовуглецевих сплавів проводяться більше ніж 70 років. При цьому, здебільшого всі дослідження проводилися для етапів виготовлення сталі у плавильних агрегатах для умов взаємодії шлако-металевої емульсії з кисневими струменями, що витікають зі звуковою та понадзвуковою швидкістю. Також є певна кількість досліджень, яка висвітлює особливості окислення домішок багатокомпонентного залізовуглецевого розплаву при впливі зниженого тиску. Отримані залежності впливу гідростатичного тиску шару металу для умов сталерозливного ковша ємністю 250-т на вірогідність протікання процесів окислення домішок багатокомпонентного залізовуглецевого розплаву, відповідно до яких можна встановити пріоритетність процесів розчинення газоподібного кисню у розплаві та утворення СО за рахунок взаємодії розчиненого кисню з вуглецем розплаву.

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.

Попередніми дослідженнями встановлено, що умовою змішування двох газових потоків є витікання вздовж однієї вісі назустріч один одному. При цьому відбувається асиміляція газових струменів за рахунок впровадження молекул газу одного потоку у інший з повною втратою швидкостей струменями. В ході проведення дослідження отримані методом тіньової зйомки фотографії взаємодії газових струменів, які дозволили встановити кути нахилу струменів до вертикалі, за яких спостерігається змішування потоків з мінімальними втратами швидкості (встановлено за характером та щільністю результуючого газового струменя, що відображається у формі та кольорі на фотографіях тіньової зйомки).

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 сумішшою системи «кисень-нейтральний газ». Вперше встановлено, що за інтенсивності  $1\text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$  (за умов збільшення витрати продувального газу на 20% у порівнянні зі стандартною технологією) відбувається утворення тангенціальних потоків, які пульсують й залучають більшу частину ванни (~ на 52%) до перемішування та ~ на 42% скорочується тривалість усереднення хімічного

складу рідини при додаванні у якості імітатора добавки, що розчиняється, хлориду натрію.

Низькотемпературне дослідження масообмінних процесів в сталерозливному ковші за рахунок продувки технологічними газами досліджується вже майже 70 років. При цьому є значні досягнення з визначення особливостей руху рідкої фази, встановлення швидкостей потоків та закономірностей розчинення феросплавних добавок. Серед дослідників цього напрямку особливе місце займають вітчизняні наукові школи ДДТУ, ІЧМ та ФТІМС. Серед досягнень зазначених дослідницьких шкіл можна виділити: визначення гідродинамічних особливостей під час продувки у ковші на двофазній моделі; визначення раціональних режимів продувки та ділянок розташування донних продувних блоків; встановлення швидкостей потоків та розподілу температур і концентрацій у об'ємі ванни сталерозливного ковша; дослідження особливостей розчинення добавок у рідкій фазі. Проте необхідно відзначити, що відповідно до сучасних уявлень, представлених у останніх публікаціях як вітчизняних так і закордонних вчених пріоритетна роль в усередненні металевої ванни саме надається вертикальному руху рідини у ковші під час продувки нейтральним газом.

Проте, в ході проведення досліджень доведено важливість впливу саме тангенційного руху бульбашкової продувки (у горизонтальній площині ванни) на ефективність процесів масообміну в металевій ванні.

4. За результатами лабораторного високотемпературного моделювання вперше встановлено, що за умов продувки металевого розплаву з вмістом вуглецю 0,3%мас. сумішшю 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.

Попередні дослідження базувалися на вдуванні в металеву ванну кисню та нейтрального газу почергово, з розділенням періодів окислення та усереднення. При цьому спостерігається локальне переокислення металевої ванни в окислювальний період. Запропоновано та доведено у лабораторних умовах, що використання у якості продувного газу суміші системи «нейтральний газ - кисень», з вмістом останнього 20-30% дозволяє здійснювати пріоритетне окислення вуглецю за режиму донної бульбашкової продувки.

#### **Практична значимість:**

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 металевої ванни скорочується на 42% у порівнянні з використанням каналної пористості.
2. Розроблено авторську методику електрокондуктометричного дослідження стосовно перерозподілу домішок в об'ємі металевої 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 сумішшю 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**

За результатами виконаних досліджень опубліковано 15 друкованих праць, в тому числі: статті у 5 фахових виданнях; 1 патент України на корисну модель; 9 тез 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 пунктах 1,3 «Наукова новизна» та в висновках розділу 4 зроблені посилання на сталерозливний ківш ємністю 250т, який в експлуатаційних умовах обладнаний двома фурмами в продувному блоці, проте в дослідженнях використано лише одну фурму в продувному блоці. Це потребує пояснення.
2. Необхідно також пояснити звідки з'явилась вимога стосовно співвідношення висоти до діаметра (1:1) у змішувача газів.
3. Пункт 5 «Загальні висновки» потребує доповнення фрази «...час змішування на 20-40% (збільшується чи зменшується?) у порівнянні...».

Проте зазначені зауваження не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

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

Дисертаційна робота Арендач Н.А. «Розробка технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 136- «Металургія».

#### **Загальний висновок на оцінка роботи**

Дисертаційна робота Арендач Н.А. на тему «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, що встановлені «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 № 44 від 12.01.2022р.), положенням «Вимог до оформлення дисертаційної роботи» (затверджених наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017р.), а здобувач **Арендач Наталя Анатоліївна** заслуговує на присудження **наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – «Металургія».**

Офіційний рецензент: старший науковий співробітник  
відділу Фізико-технічних проблем металургії сталі  
Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАНУ  
кандидат технічних наук, с.н.с.

Віталій ППТЮК

Підпис к.т.н., с.н.с. Віталія Піптюка засвідчую  
Вчений секретар ІЧМ НАНУ,  
кандидат технічних наук, с.н.с.

Лариса ГАРМАШ

