

ВІДГУК

офіційного опонента

кандидата технічних наук, доцента Жаданоса Олександра Володимировича

на дисертаційну роботу

Арендач Наталії Анатоліївни

**“Розробка технологічних засад окислювальної продувки в
сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом
вуглецю”,**

представлену на здобуття вченого ступеня доктора філософії по спеціальності
136 - “Металургія”

1. Актуальність теми дисертаційної роботи.

Сталі з низьким вмістом вуглецю мають важливе значення для виготовлення зносостійких деталей відповідальних вузлів агрегатів і машин, вони ідеально підходять для використання в автомобілебудуванні, будівництві. Однією з найважливіших їх виробництва є забезпечення мінімальних витрат матеріальних ресурсів, збільшення виходу придатного, раціональна витрата легуючих елементів.

Існуючи на даний момент методи отримання сталі з низьким ($<0,1\%C$) вмістом вуглецю мають суттєві недоліки, які у випадку з кисневими конверторами пов'язані з значним зниженням виходу придатного рідкої сталі, а, у випадку з газокисневими конверторами, конверторами аргонно-кисневого дуття, вакууматорами типу VOD та RH(OB), обмеженою кількістю на підприємствах вітчизняної металургії. Тому розробка технологій, які поєднують в собі раціональні техніко-економічні показники процесу і, водночас, мають досить просте технологічне оформлення є важливим завданням.

Тому дисертаційна робота Арендач Наталії Анатоліївни, направлена на розробку технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю, є актуальним науково-технічним завданням. Цей факт також підтверджується відповідності робити

тематиці наукових досліджень Інституту Чорної Металургії і Українського Державного Університету Науки і Технологій.

2. Оцінка структури та змісту дисертації

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, список опублікованих праць за темою дисертаційної роботи.

Робота має загальний обсяг 153 сторінки, містить 93 рисунки (з них 38 на 19 окремих сторінках), 9 таблиць, список використаної вітчизняної і зарубіжної літератури із 134 найменувань.

У вступі обґрунтована актуальність роботи, наукова новизна, достовірність і практична значимість одержаних результатів, дана загальна характеристика роботи, сформульовані основні задачі досліджень. Автором цілком вірно наголошено на те, що “актуальним завданням для вітчизняної металургійної промисловості є створення технології з виробництва низько вуглецевих сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1% у промислових умовах.”

У першому розділі виконано огляд та аналіз сучасних технологічних рішень щодо виробництва сталей з низьким вмістом вуглецю. Розділ характеризується послідовністю та методичністю викладення матеріалу: дана загальна класифікація сталей, місце та роль сталей з низьким вмістом вуглецю, узагальнено способи виробництва низьковуглецевих сталей.

Безумовно вдалим та максимально повним є аналіз існуючих на сьогодні методів отримання низьковуглецевої сталі від виробництва сталі у кисневих конверторах з різноманітними модифікаціями систем вдування, газокисневих конверторів, конверторів аргонно-кисневого дуття, методів позапічної обробки сталі. Приведені основні доводи «за і проти» їх використання для отримання низьковуглецевих сталей.

Розділ характеризується великою кількістю проаналізованої вітчизняної та закордонної літератури (100 джерел) та якісним методичним вкладенням. Фактично матеріали розділу можна використовувати для викладання дисциплін пов'язаних з теорією та технологією металургійного виробництва для аспірантів, магістрів і бакалаврів у закладах вищої освіти.

Таким чином, у розділі сформовані завдання дослідження з розробки технологічних основ отримання сталей з низьким вмістом вуглецю у стальковші за рахунок окислювальної продувки.

У другому розділі виконана термодинамічна оцінка можливості перебігу реакцій при донному продуванні металу в ковші. Для цього автором був

виконаний термодинамічний аналіз можливості протікання хімічних реакцій за показником вільної енергії Гіббса. Дисертантка здійснила ідентифікацію ділянок взаємодії газових бульбашок, що утворюються при продуванні: газова бульбашка – метал, газова бульбашка –шлак, метал – шлак.

Для аналізу було обрано 26 можливих реакцій (табл. 2.1). На жаль, сама процедура обрання реакцій, які досліджувалися на предмет ймовірності протікання під час продування киснем, залишилася поза межами роботи. Вочевидь, було використано сучасний пакет термодинамічного моделювання HSC Chemistry Outokumpu для визначення всіх можливих реакцій, що можуть мати місце під час кисневої продувки.

Для визначення ймовірності протікання зазначених реакцій виконані розрахунки енергій Гіббса в двох варіантах: з урахуванням лише температури металу, та з додатковим урахуванням гідростатичного тиску в ковші, який змінюється під час підйому бульбашки. Результати розрахунків представлено на 18 рисунках та систематизовано у таблиці 2.3. З урахуванням великої кількості математичних обчислень варто було б вказати, який саме комп'ютерний пакет було використано при розрахунках.

Аналіз отриманих результатів дав можливість встановити, які саме реакції можуть протікати при донній продувці, розташувати їх у відповідності з ймовірністю протікання та зробити висновки щодо впливу гідростатичного тиску на їх протікання у сталеплавильному ковші.

Третій розділ присвячено дослідженню конструктивних особливостей продувних блоків та їх вплив на якість масопереносу при вдуванні суміші газів, що містять кисень. Дисертантка здійснила визначення основних параметрів, що впливають на масообмінні процеси в ванні сталерозливного ковша. У якості цільової функції, що визначає ефективність масообмінних процесів в об'ємі розплаву сталерозливного ковша прийнято час гомогенізації. Для досліджень використано метод низькотемпературного фізичного моделювання. За участю дисертантки розроблена спеціальна лабораторна установка, на якій було проведено низку експериментів.

У першій частині експериментальних досліджень вивчався вплив характерного розміру прохідного каналу донного продувального блоку (модель продувального блоку з щільним прохідним перетином, розроблена за участю дисертантки) на час гомогенізації металевих ванни. На основі обробки даних за методикою автотемпературності вдалося визначити раціональні розміри щілин, які повинні складати 1-2 мм. На жаль, в роботі не наведено детального розрахунку

похідної логарифма критерію гомохронності, що дещо ускладнює сприйняття матеріалу і не дає можливість оцінити коректність виконаних розрахунків.

На другому етапі досліджувалася ефективність гомогенізації рідини під час продування в залежності від видів продувочних блоків для вдування газів: з каналними бульбашкоутворювачами, щілинними, з ненаправленою пористістю. Зроблено апостеріорний висновок, що “найбільш ефективною конструкцією бульбашкоутворювача в складі донного пристрою для продування розплавів є використання матеріалів неорієнтованої пористості або щілинних бульбашко утворювачів”. Безумовно, це твердження потребує перевірки на промисловому об’єкті, що є наступним напрямком досліджень.

Родзинкою цього розділу є отримані рекомендації щодо вдосконалення конструкції донного продувочного блоку для умов продувки сумішшю двох газів. Запропоновано ввести в конструкцію донного продувочного блоку камеру попереднього змішування технологічних газів, що підводяться через окремі циліндричні канали. Під час експериментів встановлено, що оптимальні кути відхилення каналів від вертикальної осі повинні становити 25-40°, що, безумовно, є елементом наукової новизни. Отриманий результат дає можливість мінімізувати втрати швидкості і тиску при змішуванні.

У четвертому розділі досліджено особливості перемішування рідкої ванни при донній бульбашковій продувці за різних параметрів дуття. Заслугує на схвалення створення лабораторної установки, яка фактично є дворівневою автоматизованою інформаційною системою, за рахунок передачі даних через АЦП на комп’ютер. Це дозволяє здійснювати цифрову обробку та аналіз отриманих даних. Важливими частинами лабораторної установки окрім зазначеної АЦП є модель ківшу з донним продувочним блоком (в якості модельних речовин використана вода та сіль NaCl), повітряний компресор, система регулювання подачі повітря, відеокамера, датчики контролю електропровідності. На жаль, в роботі не вказано технічні параметри і, який тип датчиків електропровідності було використано.

З використанням критеріїв подібності гідродинамічних систем, а саме: критеріїв Вебера, Фруда, Рейнольдса, Архімеда, модифікованого критерію Фруда, обґрунтовано параметри проведення експериментальних досліджень з метою найбільшої відповідності промисловому об’єкту – ківшу місткістю 250 т підприємства Камет-сталь. При цьому твердження “відповідно до рівняння (4.6) встановлено, що витрата продувочного газу на моделі повинна бути у 2,85 рази більша за витрату продувочного газу на реальному промисловому об’єкті”

потребує додаткового обґрунтування, оскільки в роботі не наведено відповідні розрахунки, що не дає можливість оцінити їх коректність.

За результатами досліджень отримана низка цікавих для науки результатів:

- зміна концентрації модельної речовини – солі NaCl на поверхні розчину та у середині модельного ковша за час продувки при різних витратах продувального газу. Про цьому деякі отримані результати потребують додаткового обґрунтування: на рисунках 4.3 та 4.4 отримані сплайн-графіки концентрації модельної речовини при витратах продувального газу від 0,171 – 1,368 м³/т·год. Графіки 4 (витрати 1,026 м³/т·год) відповідають відносно плавній зміні концентрації, що відповідає законам масопереносу, водночас, на інших графіках цей процес відбувається ступінчасто. Особливо це стосується графіку 5 (витрати 1,368 м³/т·год).
- Оцінена якість процесу утворення бульбашок для різних витрат продувального газу з використанням відеозйомки та наступного аналізу за допомогою графічного пакету Coreldraw в залежності від режимів продувки.
- Отримані рівні електропровідності в кінці продувки за всіма датчиками при різних витратах продувального газу (рис. 4.17-4.21), що дозволило зробити висновки щодо ступеню рівномірності розповсюдження модельної присадки солі. При цьому, при описі даного параметру в роботі приводиться його оцінка на якісному рівні (“краще рівномірне розповсюдження”, “найбільша неоднорідність показників”) без конкретних кількісних характеристик.
- За рахунок безперервних вимірювань отримана динаміка електропровідності за датчиками, що розташовані близько до фурми та на протилежній стороні ковша. Це дало можливість оцінити в динаміці зміну концентрації модельної речовини в різних ділянках, наявність чи відсутність застійних зон, отримати інформацію щодо часу, потрібного на гомогенізацію в залежності від витрат газу, що вдується. Слід зазначити, що подальша обробка експериментальних даних методом “Швидкого перетворення Фур’є” (Fast Fourier transformer) або вейвлет-аналізу (wavelet) дозволить отримати кількісні оцінки рівня гомогенізації та нові данні щодо перебігу гідродинамічних процесів в ванні ковша.

Таким чином, проведені експериментальні дослідження та їх аналіз дозволили зробити висновки щодо раціонального режиму вдування газу. Встановлено, що найкращі результати гомогенізації отримано при

інтенсивності введення у ванну газу $1,026 \text{ м}^3/\text{т} \cdot \text{сталі}$ на годину ($0,36 \text{ м}^3/\text{т}$ сталі на год при перерахуванні на реальний промисловий об'єкт – сталерозливний ківш ємністю 250 т).

У п'ятому розділі з метою оцінки можливості окислення вуглецю при його невеликій кількості у розплаві було проведено високотемпературне фізичне дослідження в лабораторній індукційній печі ємністю 1 кг. Для проведення експериментів була розроблена відповідна лабораторна установка. Сутність дослідження полягала у вдуванні газової суміші кисень-нітроген різної концентрації в розплавлений метал (сталі 3) через алундову трубку з діаметром отвору 2 мм, яку по расплавленню металеві ванни було занурено крізь отвір у кришці моделі до самого днища тигля та періодичному хімічному аналізу динаміки вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, сірки, фосфору. Для визначення раціональної витрати суміші кисень-інертний газ було виконано додатковий експеримент на холодній моделі. Встановлено, що раціональні витрати газу на продування повинні складати $0,075 \text{ л/год}$.

За результатами проведення високотемпературного дослідження дисертантка зробила цілком обґрунтований висновок щодо оптимального вмісту кисню в суміші продувних газів. Встановлено, що раціональним є вміст кисню 30%. У випадку меншого вмісту кисню ефективність видалення вуглецю є недостатньою, а у разі більшого – окислюється значна кількість кремнію та марганцю при незначному збільшенні швидкості окислення вуглецю.

Також за результатами експериментальних досліджень отримані три регресійні моделі у вигляді поліномів другого ступеню, які описують зниження вмісту вуглецю в залежності від часу продування (60-240 с) при вмісті кисню у суміші газу 10%, 30% та 50% відповідно. Самі моделі мають високий коефіцієнт детермінованості (від 0,96 до 0,99) та використані автором роботи для прогнозування вмісту вуглецю у розплаві через 8-10 хвилин продування. Позитивно оцінюючи отримані результати, слід зазначити, що регресійні моделі побудовані лише по 4-ох експериментальних точках і мають три складових (першого ступеня, другого ступеня, вільний коефіцієнт). Тобто ступінь свободи (різниця між кількістю експериментальних точок і кількістю коефіцієнтів регресійного рівняння) складає лише одиницю. Тому для використання отриманих моделей для прогнозування вмісту вуглецю необхідно додатково провести дисперсійний аналіз, зокрема, обчислити стандартні помилки для коефіцієнтів, а також здійснити перевірку значимості коефіцієнтів рівнянь за критерієм Стюдента. Додатково вирішенню проблеми надійності

отриманих рівнянь може сприяти збільшення кількості експериментальних точок або проведення декількох експериментів і усереднення отриманих результатів.

За результатами роботи сформульовані загальні висновки, які відповідають завданням роботи, що свідчить про виконання плану дисертаційного дослідження.

Аналіз розділів роботи дозволяє зробити висновки, що дисертація добре оформлена, написана грамотною технічною мовою, характеризується цілісністю, високим науковим рівнем. За своїм змістом і рівню досліджень, по своїй завершеності і практичним результатам дана робота відповідає вимогам, що пред'являються до дисертацій на здобуття наукового ступеню доктора філософії.

3. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні положення дисертації опубліковані в 17 наукових працях, у тому числі: 5 статей, що внесені до переліку фахових видань України (1 англійською мовою), 1 патент України на корисну модель, 11 тез доповідей міжнародних та всеукраїнських науково-технічних і науково-практичних конференцій, одна з яких проходила за кордоном.

Розділи дисертації висвітлено в опублікованих працях Арендач Н.А. згідно номерам, наведеним у списку дисертації:

- Розділ 1 – доповідь на міжнародній конференції №12
- Розділ 2 - фахова №4, доповідь на міжнародних конференціях №8, №10 №11
- Розділ 3. Фахові №1, №2, №5, патент на корисну модель №6, доповідь на міжнародних конференціях №7, №9, №13
- Розділ 4. Фахова №3, доповідь на конференції №15
- Розділ 5 Доповідь на конференції №14, 15, 16, 17

Таким чином, опубліковані праці достатньо повно відображають основний зміст роботи.

4. Аналіз наукових результатів дисертації

Перший пункт наукової новизни: “Отримали подальшого розвитку уявлення щодо перебігу окислювальних реакцій в багатокомпонентних

залізовуглецевих сплавах за рахунок кисневмісної 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”

Проблемами термодинамічних досліджень процесів окислення складових домішок багатокомпонентних залізовуглецевих сплавів займалася досить велика кількість дослідників до і одночасно з дисертанткою. Переважна більшість досліджень відноситься до процесів виплавки сталі у плавильних агрегатах для умов взаємодії шлако-металевої емульсії з кисневими струменями, що витікають зі звуковою та понадзвуковою швидкістю.

Заслугою здобувачки і новим внеском є детальне вивчення впливу феростатичного тиску на можливість протікання реакцій окислення при вдуванні кисню. Дисертантка здійснила ідентифікацію ділянок взаємодії газових бульбашок, що утворюються при продуванні: газова бульбашка – метал, газова бульбашка –шлак, метал – шлак. Завдяки розрахункам енергій Гіббса з урахуванням феростатичного тиску в ковші, який змінюється під час підйому бульбашки, встановлено, які саме реакції можуть протікати при донній продувці. Порівняльні розрахунки енергії Гіббса для реакції окислення вуглецю при нормальних умовах та з урахуванням феростатичного тиску дозволили встановити, що реакція окислення вуглецю в ковші при продувці металу киснем має сприятливі умови для протікання.

Другий пункт наукової новизни: “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”

Новизна даного пункту полягає у визначенні раціонального кута підведення потоків кисню і інертного газу у камеру змішування і забезпеченні при цьому мінімальних втрат швидкостей і тисків. Зазначене є дуже важливим, оскільки швидкість витікання суміші газів під визначеним тиском є запорукою проведення якісного зневуглицювання. Як вірно зазначено у роботі, підведення газів під прямим кутом назустріч один одному призводить до майже повної втрати швидкостей за рахунок впровадження молекул газу одного потоку у

інший. Під час експериментів встановлено, що оптимальні кути відхилення каналів від вертикальної осі повинні становити 25-40°. Отриманий результат дає можливість мінімізувати втрати швидкості і тиску струменями при змішуванні.

Третій пункт наукової новизни: “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 сумішшю 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 (~ на 52%) до перемішування та ~ на 42% скорочується тривалість усереднення хімічного складу рідини при додаванні у якості імітатора добавки, що розчиняється, хлориду натрію.”

Значення цього наукового положення полягає в тому, що за результатами досліджень отримані нові наукові знання щодо поведінки бульбашок в залежності від витрат газу. Відмінною рисою отриманих результатів від раніше відомих є те, що визначені режими продування, при яких спостерігається найбільший потік з бульбашок, які мають не тільки прямолінійний рівномірний рух, але й на певній висоті від продувного блоку набувають імпульсний рух з кутовою швидкістю, що спричиняє перемішування в об'ємі ванни до того, як бульбашки досягнуть поверхні. Подібні рухи бульбашок підвищують час і ефективність контакту з вуглецем в розплаві, що сприятиме зневуглицюванню. Встановлено, що найкращі результати гомогенізації отримано при інтенсивності введення у ванну газу $1,026\text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі на годину}$ ($0,36\text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{сталі на годину}$ при перерахуванні на реальний промисловий об'єкт – сталерозливний ківш ємністю 250 т).

Четвертий пункт наукової новизни: “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”

Як правильно відмічає дисертантка, наукова новизна цього положення полягає в тому, що вперше встановлено раціональне співвідношення кисень – нейтральний газ при продувці металу, що дозволяє з одного боку забезпечити

досить швидко і ефективно зневуглицювання і запобігти при цьому надлишковому окисленню цінних легуючих елементів. За результатами дослідження на лабораторній установці під час плавлення сталі марки 3 в тигельній печі з вдуванням суміші кисень-нітроген при різних співвідношеннях газів зроблено цілком обґрунтований висновок щодо оптимального вмісту кисню в суміші. Встановлено, що раціональним є вміст кисню 30%. У випадку меншого вмісту кисню ефективність видалення вуглецю є недостатньою, а у разі більшого – окислюється значна кількість кремнію та марганцю при незначному збільшенні швидкості окислення вуглецю. Розрахована швидкість окислення вуглецю дозволяє прогнозувати його вміст в залежності від часу продування.

5. Практична значимість отриманих результатів

Значення для науки розробок і висновків авторки полягає в комплексності і системності опрацювання питання обґрунтування можливості використання зневуглицювання сталевих розплавів під час позапічної обробки сталі у ковші:

1. Запропоновано нову конструкцію донного продувального блоку для продувки залізовуглецевого розплаву газовою сумішшю системи «кисень-нейтральний газ». Конструкція відрізняється від раніш розроблених тим, що вона складається із бульбашкоутворювача, камери для змішування газів та каналів для підведення газів. Отримано патент України (№ 126453 «Вогнетривкий блок для продувки металу газами»).

2. Створено лабораторну установку, яка фактично є дворівневою автоматизованою інформаційною системою, за рахунок передачі даних через АЦП на комп'ютер. Це дозволяє здійснювати цифрову обробку та аналіз отриманих даних щодо особливості перемішування рідкої ванни при донній бульбашковій продувці за різних параметрів дуття. Важливими частинами лабораторної установки окрім зазначеної АЦП є модель ківшу з донним продувним блоком (в якості модельних речовин використана вода та сіль NaCl), повітряний компресор, система регулювання подачі повітря, відеокамера, датчики контролю електропровідності. Для оцінки ступеню гомогенізації модельної рідини запропоновано оцінювати такий параметр як електропровідність, що, безумовно, оригінальною авторською ідеєю.

3. За результатами досліджень розроблено технологічні рекомендації щодо використання технології донної продувки рідкого розплаву у

сталерозливному ковші при позапічній обробці сумішшю газів системи «кисень-нейтральний газ» у промислових умовах.

4. Матеріали дисертації і розроблені лабораторні установки можна використовувати для викладання дисциплін пов'язаних з теорією та технологію металургійного виробництва для аспірантів, магістрів і бакалаврів у закладах вищої освіти і проведення відповідних мультидисциплінарних досліджень.

6. 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 спеціальності 136 «Металургія», а рівень набутих здобувачем компетентостей – “стандарту вищої освіти зі спеціальності 136 Металургія для третього (освітньо-наукового рівня вищої освіти)”, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки № 1425 від 23.12.2021.

7. Зауваження по дисертаційній роботі.

1. У розділі 2 дисертаційної роботи “Термодинамічна оцінка можливості перебігу реакцій при донному продуванні металу в ковші” для аналізу можливості протікання було обрано 26 реакцій (табл. 2.1). На жаль, сама процедура обрання реакцій, які досліджувалися на предмет ймовірності протікання під час продування киснем, залишилася поза межами роботи. Вочевидь, було використано сучасний пакет термодинамічного моделювання HSC Chemistry Outokumpu для визначення всіх можливих реакцій, що можуть мати місце під час кисневої продувки. Для визначення ймовірності протікання зазначених реакцій виконані розрахунки енергій Гіббса в двох варіантах: з урахуванням лише температури металу, та з додатковим урахуванням гідростатичного тиску в ковші, який змінюється під час підйому бульбашки. Результати розрахунків представлено на 18 рисунках та систематизовано у таблиці 2.3. З урахуванням великої кількості математичних обчислень варто було б вказати, який саме комп'ютерний пакет було використано при розрахунках.

2. У розділі 3 дисертаційної роботи “Вдосконалення конструкції донного продувального блоку для забезпечення продувки сумішшю газів, що містить кисень” у першій частині експериментальних досліджень вивчався вплив

характерного розміру прохідного каналу донного продувного блоку (модель продувного блоку з щілинним прохідним перетином, розроблена за участю дисертантки) на час гомогенізації металевої ванни. На основі обробки даних за методикою автомоделюваності вдалося визначити раціональні розміри щілин, які повинні складати 1-2 мм. На жаль, в роботі не наведено детального розрахунку похідної логарифма критерію гомохронності, що дещо ускладнює сприйняття матеріалу і не дає можливість оцінити коректність виконаних розрахунків.

3. У розділі 4 дисертаційної роботи досліджено особливості перемішування рідкої ванни при донній бульбашковій продувці за різних параметрів дуття. Важливою частиною створеної для досліджень лабораторної установки є датчики контролю електропровідності. На жаль, в роботі не вказані їх технічні параметри і, який тип датчиків електропровідності було використано.

4. У четвертому розділі з використанням критеріїв подібності гідродинамічних систем, а саме: критеріїв Вебера, Фруда, Рейнольдса, Архімеда, модифікованого критерію Фруда, обґрунтовано параметри проведення експериментальних досліджень з метою найбільшої відповідності промислового об'єкту – ківшу місткістю 250 т підприємства Камет-сталь. При цьому твердження “відповідно до рівняння (4.6) встановлено, що витрата продувного газу на моделі повинна бути у 2,85 рази більша за витрату продувного газу на реальному промисловому об'єкті” потребує додаткового обґрунтування, оскільки в роботі не наведено відповідні розрахунки, що не дає можливість оцінити їх коректність.

5. У розділі 4 дисертаційної роботи отримані рівні електропровідності в кінці продувки за всіма датчиками при різних витратах продувного газу (рис. 4.17-4.21), що дозволило зробити висновки щодо ступеню рівномірності розповсюдження модельної присадки солі. При описі даного параметру в роботі приводиться його оцінка на якісному рівні (“краще рівномірне розповсюдження”, “найбільша неоднорідність показників”) без конкретних кількісних характеристик. Слід зазначити, що подальша обробка експериментальних даних з електропровідності, які поступають від датчиків, методом “Швидкого перетворення Фур'є” (Fast Fourier transformer) або вейвлет-аналізу (wavelet) дозволить отримати кількісні оцінки рівня гомогенізації та нові дані щодо перебігу гідродинамічних процесів в ванні ковша.

6. У розділі 5 дисертаційної роботи “Високотемпературне дослідження можливості окислення вуглецю при донному бульбашковому продуванні

залізовуглецевого розплаву сумішшю кисень – інертний газ” за результатами експериментальних досліджень отримані три регресійні моделі у вигляді поліномів другого ступеню (рис. 5.7, стор. 134), які описують зниження вмісту вуглецю в залежності від часу продування (60-240 с) при вмісті кисню у суміші газу 10%, 30% та 50% відповідно. Самі моделі мають високий коефіцієнт детермінованості (від 0,96 до 0,99) та використані автором роботи для прогнозування вмісту вуглецю у розплаві через 8-10 хвилин продування. Позитивно оцінюючи отримані результати, слід зазначити, що моделі побудовані лише по 4-ох експериментальних точках і мають три складових (першого ступеня, другого ступеня, вільний коефіцієнт). Тобто ступінь свободи (різниця між кількістю експериментальних точок і кількістю коефіцієнтів регресійного рівняння) складає лише одиницю. Тому для використання отриманих моделей для прогнозування вмісту вуглецю необхідно додатково провести дисперсійний аналіз, зокрема, обчислити стандартні помилки для коефіцієнтів, а також здійснити перевірку значимості коефіцієнтів рівнянь за критерієм Стюдента. Додатково вирішенню проблеми надійності отриманих рівнянь може сприяти збільшення кількості експериментальних точок або проведення декількох експериментів і усереднення отриманих результатів.

Приведені зауваження не вносять коректив в основні висновки і пропозиції і не знижують загальної цінності роботи.

8. Загальний висновок та оцінка дисертаційної роботи

З вищевикладеного виходить, що дисертаційна робота Арендач Наталії Анатоліївни на тему “Розробка технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю”, яку представлено на здобуття наукового ступеня доктора філософії, по своїм одержаним теоретичним і практичним результатам, є завершеним науковим дослідженням. Здобувачка продемонструвала “здатність розв’язувати комплексні проблеми в галузі професійної та/або дослідницько-інноваційної діяльності в металургії, що передбачає глибоке переосмислення наявних та створення нових цілісних знань та/або професійної практики”. Загальні висновки дисертаційної роботи відповідають її змісту. Дисертаційна робота повністю відповідає спеціальності 136 «Металургія», а рівень набутих здобувачем компетентостей – “Стандарту вищої освіти зі спеціальності 136

Металургія для третього (освітньо-наукового рівня вищої освіти)”, затвердженого Наказом Міністерства освіти і науки № 1425 від 23.12.2021.

Аналіз наукової новизни, практичних результатів, висновків і рекомендацій дозволяють зробити висновок про відповідність дисертаційної роботи вимогам «Порядку присудження ступеню доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеню доктора філософії», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12.01.2022 р., положенням “Вимог до оформлення дисертації”, затверджених наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. із змінами, внесеними згідно з Наказом Міністерства освіти і науки № 759 від 31.05.2019, .

Кількість, обсяг та рівень видання публікацій відповідають вимогам МОН України. Аналіз особистого внеску автора роботи вказує на високий ступінь самостійності виконання досліджень та публікування їх результатів.

Таким чином, на підставі наведеного вище, вважаю, що здобувачка Арендач Наталія Анатоліївна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136-«Металургія».

**Офіційний опонент,
доцент кафедри електromеталургії
ім. академіка М.І. Гасика
Українського державного університету
науки і технологій,
кандидат технічних наук, доцент**



Олександр ЖАДАНОС

Підпис Жаданоса Олександра Володимировича засвідчую



В.С. Шифрін