

**До спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.03 при Національній
металургійній академії України**

**ВІДЗИВ
офіційного опонента**

доктора технічних наук, професора Стовпченко Ганни Петрівни
на дисертаційну роботу Недбайла Миколи Миколайовича "Розвиток теорії
та розробка ресурсозберігаючої технології нанесення шлакового гарнісажу
на футерівку конвертера", яку представлено на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – "Металургія чорних і
кольорових металів та спеціальних сплавів"

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі Недбайла М.М. проаналізовано характер протікання процесів гідрогазодинаміки роздування шлакової ванни у конвертері з комбінованим продуванням з метою нанесення шлакового гарнісажу для підвищення стійкості футерівки конвертера. Значну увагу приділено дослідженню та визначенню режимів взаємодії над- та дозвукових газових струменів зі шлакової ванною та формування цільового газошлакового потоку, а також вивченню особливостей адгезії шлаку, якого модифікованого добавками, до вогнетриву. В своїй роботі дисертант приділив значну увагу аналізу сучасного стану технологій роздування кінцевого шлаку, щоб визначити належне місце та перспективні області застосування нових технологічних схем, які він розробляв та досліджував. Завдяки цьому він адекватно сформулював цілі і задачі роботи й перевірів актуальність та доцільність свого напрямку досліджень.

Вивчені гідрогазодинамічні та тепломасообмінні закономірності процесів роздування шлакової й запропоновані способи коригування фізико-хімічного стану шлакової ванни та важелі керування напрямком руху відхідних газошлакових потоків дозволили автору сформулювати умови, що забезпечують формування гарнісажного покриття заданої товщини у заздалегідь визначених зонах на робочій поверхні вогнетривів конвертера, які є найбільш вразливими. Важливим здобутком автора стало й встановлення ступеню впливу донних струменів на обсяг й напрямки винесення шлакових крапель та умови попередження «запечаткування» донних вставок.

Тема дисертації Недбайла М.М. є актуальною і важливою, оскільки використання технологій ошлакування футерівки є сучасним трендом підвищення її стійкості, й дозволяє збільшити міжремонтний цикл експлуатації агрегату, скоротити витрати вогнетривких матеріалів, що сприяє сталому розвитку сучасної металургії. Важливим здобутком роботи є розроблена автором методика проектування багаторусної гарнісажної фурми, що надає можливість їх виготовлення для конкретних агрегатів та інакших умов виробництва. Тому можна стверджувати, що в роботі вирішено важливу науково-прикладну задачу підвищення ресурсозбереження й ефективності конвертерного виробництва сталі, що сприятиме підвищенню конкурентоспроможності вітчизняної сталі.

Запропоновані автором конструкції двоярусних фурм із можливістю зміни відстані між ярусами по ходу кампанії конвертера по футерівці є оригінальними патентованими технічними рішеннями, що підвищують гнучкість реагування в ході кампанії конвертеру. Виконана робота є своєчасною, оскільки конкурентоспроможність Української металургії в умовах глобального світового ринку може бути забезпечена тільки за рахунок модернізації обладнання і його критичних компонентів (якими є запропоновані двоярусні фурми), та використання сучасних енерго- та ресурсо-ефективних технологій. На підставі вищеванеденого можна

стверджувати, що **актуальність** роботи не піддається сумніву.

Напрямок дисертації відповідає вимогам керівних документів МОН України про присудження вчених ступенів.

2. Наукова новизна отриманих результатів

Проведений мною аналіз викладених в дисертації Недбайла М.М. наукових положень та висновків дозволяє виділити ряд суттєво **нових наукових результатів**, отриманих особисто автором, до яких відносяться:

1) Формалізовані закономірності взаємодій газових струменів при роздуванні шлакової ванни для нанесення гарнісажу на футерівку, що викладено у вигляді класифікації режимів: «намивання» шлаку при утворенні неглибоких кратерів й відношенні висоти наконечника фурми до діаметра кола розміщення донних вставок менш ніж 0,28, «розведення» реакційних зон при відношенні від 0,28 до 0,44 та «пробою» ванни при відношенні більш ніж 0,44, відповідно.

Вперше встановлений ступінь впливу донних струменів на обсяг й напрямки винесення шлакових крапель та умови попередження «запечаткування» донних вставок.

2. Уперше встановлений прямими вимірюваннями та підтверджений розрахунками фактичний розподіл гарнісажного шару на футерівці конвертера. Це дозволило обґрунтувати спосіб коригування профілю робочого простору агрегату з використанням двоярусної фурми. Визначений ступінь впливу бокових газових струменів верхнього ярусу на потік шлакових крапель та умови перенаправлення останніх у визначені зони на стінах конвертера. Раціональне співвідношення між кутом нахилу сопел верхнього ярусу та сопел Лаваля фурми для забезпечення максимальної густини шару гарнісажу на футерівці знаходиться у діапазоні 3,8-4,1.

3. Отримали подальший розвиток наукові уявлення щодо фізико-хімічної схеми утворення гарнісажного шару на поверхні вогнетриву при

роздуванні модифікованого конвертерного шлаку та підтверджено блокуючу дію монооксиду вуглецю для фільтрації модифікованого шлаку у пори вогнетривів.

4. Вперше на основі експериментальних досліджень та чисельних розрахунків встановлені залежності між хімічним складом шлаку, кількістю й діаметром тугоплавких часток, крайовим кутом змочування шлаком вогнетриву та роботою адгезії. Внесення тугоплавких часток у кількості 6-8 % від маси шлаку змінює роботу адгезії до вогнетриву на 0,2...0,8 Н/м², у залежності від співвідношення вмісту (CaO) та (MgO). Раціональним визнано розосереджене у часі внесення до шлаку тугоплавких часток діаметром 1-3 мм.

5. Розроблено методику визначення необхідної тривалості роздування шлакової ванни та висоти розташування двоярусної фурми по ходу операції. Вперше встановлено, що при роздуванні шлаку у 250-т конвертері зі застосуванням наконечника фурми з соплами Лаваля (з кутом нахилу 170градусів) та розташованими на відстані у 2,5 м соплами верхнього блоку (з кутом нахилу 1150), висота нанесеної б шлакової «плями» не залежить від розташування фурми, та складає 3,27 м. Це визначає умови коригування профілю робочого простору конвертера шляхом зміни напрямку витoku бокових струменів та переміщенням фурми по висоті (НФ) за заданим алгоритмом. За результатами чисельного моделювання визначено, що площа перекриття боковими струменями робочої поверхні конвертера складає від 29,5 до 46,9 % і для умов 250-т конвертера значення НФ повинні бути у діапазоні 1,50-1,65 м у першій та 0,40-0,55 м у основний період роздування шлакової ванни.

Новизна запропонованих конструкцій фурм підтверджується одержаними автором патентами України.

3. Практична цінність дисертаційної роботи

Практична цінність дисертаційної роботи Недбайла М.М. полягає у визначенні гідрогазодинамічних та тепломасообмінних феноменів, що

відбуваються при роздуванні шлакової ванни до- та над- звуковими газовими струменями, та розробки обґрунтованих методів кондиціонування шлаку для покращення його адгезії до вогнетривів футерівки. Завдяки цьому автором розроблено енерго- й ресурсозаощадливий спосіб відновлення раціонального профілю робочого простору кисневого конвертера з донним продуванням та оригінальні конструкції фурм для його реалізації.

Хочу відмітити розроблені експериментальні установки й авторські методики моделювання процесів роздування шлаку на стіни конвертера з комбінованим продуванням ванни та для дослідження умов ошлакування гетерогенним модифікованим конвертерним шлаком поверхні периклазовуглецевих вогнетривів.

Практичний інтерес представляють й запропоновані автором математичні моделі та методики розрахунку, придатні для моделювання газогідродинаміки роздування шлакової ванни, визначення товщини нанесеного гарнісажного шару при перемінному (по ходу операції) положенні фурми, визначення раціонального складу конвертерного шлаку з тугоплавкими частками, умов його розтікання по футерівці та утворення гарнісажного шару.

Запропоновані технічні та технологічні рішення щодо способу роздування шлакової ванни в умовах КЦ ПАТ «Дніпровський МК» забезпечили вагомий енергетичний (від 14,4 до 36,46 МДж/т) та економічний ефект.

4. Достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій є результатом використання в роботі сучасних методів фізико-хімічного та математичного моделювання, фізичної обґрунтованості та коректності запропонованих методик, перевірки одержаних результатів різними методами, в тому числі експериментальні

дослідження та промислові випробування розроблених технологій та технічних рішень. Теоретичні дослідження ґрунтувались на фундаментальних положеннях гідродинаміки, тепломасообміну й термодинаміки, фундаментальних положеннях системного аналізу. Наукові положення, висновки і рекомендації автора узгоджуються зі загальноприйнятними положеннями фізики та теорії металургійних процесів. Використані повнофакторні плани проведення експериментів. Точність представлених у роботі результатів і залежностей є достатньою для їх подальшого практичного використання.

5. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях.

Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи досить повно висвітлені в 13 наукових статтях в фахових науково-технічних журналах (3 з котрих опубліковано у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз, 7 у фахових виданнях, що включено до переліку ВАК України й 3 у спеціалізованих періодичних виданнях) і 2 патентах України. Перелік публікацій, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації та у повній мірі відображають основні положення, наукові результати та висновки роботи дисертанта. Результати дисертаційної роботи були обговорені і отримали позитивну оцінку на 9 фахових науково-технічних конференціях, в тому числі міжнародних.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності

Представлена дисертаційна робота **Недбайла Миколи Миколайовича** складається зі вступу, п'яти розділів основного тексту, що викладений на 172 сторінках (зокрема 16 таблиць і 65 рисунків), висновків, переліку використаних джерел (121 посилання на 11 сторінках), чотирьох додатків на 9 сторінках. Дисертація містить титульний аркуш, необхідні

анотації, зміст, список використаних джерел та 4 додатки на 9 сторінках. Загальний обсяг тексту роботи складає 192 сторінки.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, відзначено особистий внесок автора в публікаціях, перераховано конференції та яких проходила апробація результатів роботи, наведено структура і обсяг дисертації.

У першому розділі наведені дані щодо сучасного стану технологій гарячого ремонту периклазовуглецевої футерівки конвертера та виконано критичний аналіз переваг та недоліків сучасних способів торкретування, підварювання та роздування підготовленого кінцевого конвертерного шлаку тощо.

У другому розділі представлено методики та устаткування для низькотемпературного моделювання гідрогазодинаміки роздування рідкої ванни у конвертері із комбінованим продуванням та високотемпературного моделювання взаємодії шлаку з вогнетривом.

У третьому розділі досліджено гідрогазодинамічні закономірності нанесення гарнісажного покриття шляхом роздування рідкої ванни на робочу поверхню футерівки конвертера при її комбінованому продуванні газовими струменями.

Теоретично обґрунтована необхідність переходу до використання двоярусної фурми, що здатна забезпечити кероване перенаправлення частини газорідного потоку у визначені зони на стінах конвертера.

Розроблено методику розрахунку впливу тиску бокових струменів на газошлаковий потік. Встановлено, що найбільш впливовими параметрами є площа та діаметр утвореного перетину бокових струменів з потоком.

У четвертому розділі наведено результати математичного моделювання гідро газодинаміки роздування ванни з нанесенням на стіни конвертера гарнісажного покриття та фізичного моделювання розтікання

модифікованого шлаку по поверхні вогнетриву з утворенням гарнісажного шару.

Математичним моделювання гідрогазодинаміки роздування ванни становлено, що при проведенні роздування шлаку за чотирьома режимами, режим IV ($H_f = 5; 4; 3; 1$ м ($\tau = 1:1:1:2$)) забезпечує відносно рівномірний за товщиною гарнісажний шар на футерівці.

Проведено серію високотемпературних експериментів для визначення значень крайового кута змочування шлаком поверхні периклазовуглецевого вогнетриву. Встановлено, що найбільш впливовим на зміну крайового кута змочування фактором є вміст СаО.

У п'ятому розділі наведені результати проектування та впровадження нової конструкції двоярусної гарнісажної фурми та технології нанесення шлакового гарнісажу з її використанням в умовах конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат».

Для комбінованого роздування ванни запропонований спосіб роздування шлакової ванни з розосередженим у часі вводом суміші порошкоподібних тугоплавких часток на основі MgO до гарнісажного шлаку по ходу операції (одержано патент).

Вважаю за потрібне відмітити наступні позитивні риси роботи, що представляється М.М. Недбайлом до захисту:

В цілому - в роботі ясно й чітко поставлені задачі, які вирішуються методично коректно й послідовно:

- критичний аналіз переваг та недоліків сучасних способів уходу за футерівкою дає підстави для теоретичного обґрунтування переваги роздування кінцевого модифікованого шлаку азотними струменями з використанням спеціалізованих гарнісажних фурм;

- для підтвердження теоретичних висновків розробляються методики та устаткування для низькотемпературного моделювання гідрогазодинаміки роздування рідкої ванни у конвертері із комбінованим продуванням

- процеси, що супроводжують взаємодію шлаку з вогнетривом перевіряються високотемпературним моделюванням з близькими до натурних умовами;

- винайдені закономірності перевіряються дослідно-промисловим випробуванням й вводяться до математичних моделей, які дозволяють розширити розуміння механізмів, що діють, й створити методики розрахунку необхідної тривалості роздування ванни та положення наконечника фурми над шлаковою ванною й розрахунку конструкції фурм, що можуть бути широко використані в подальшому для прогнозування поведінки аналогічних систем та конструювання ефективних пристроїв.

Такий підхід відкриває широкі можливості прогнозування й перевірки винайдених закономірностей, аж до їх промислового впровадження.

Автор володіє експериментальними методами дослідження металургійних процесів й використовує математичне моделювання. Теоретичні викладки й інженерні розрахунки автору підтверджуються результатами безпосередніх експериментів в лабораторних й промислових умовах.

Цілком погоджуюсь, що виконані дослідження дозволяють автору стверджувати, що ним вирішене актуальне науково-практичне завдання розвитку наукових основ й удосконалення технології нанесення захисного шлакового гарнісажу на футерівку конвертера шляхом визначення закономірностей формування заданих фізико-хімічних властивостей шлакової ванни та способів коригування напрямку винесення шлакових крапель з ванни на проблемні зони на футерівці, що забезпечує підвищення стійкості гарнісажу, відновлення раціонального профілю робочого простору агрегату, зменшення собівартості гарячих ремонтів та підвищення техніко-економічних показників роботи конвертерного цеху.

В цілому дисертація відрізняється логічним викладенням наукових

матеріалів дослідження і оформлена відповідно до існуючих норм.

Підтверджена промислово ефективність розроблених в роботі методів, новизна, обґрунтованість і практична цінність отриманих результатів, їх достовірність, а також відповідність поставлених задач зробленим висновкам дають підстави зробити висновок про **закінченість** дисертації в цілому.

Зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

7. Загальні зауваження до дисертаційної роботи:

За текстом дисертації та автореферату є ряд зауважень

1. Автор констатує значно (на порядок і вище) більшу стійкість футерівки за кращими світовими зразками (яка так само захищена роздуванням шлаку), ніж досягнена на вітчизняних підприємствах, в тому числі й тому де виконано впровадження. Сподіваюсь на захисті почути відповідь на те які є тому причини.

2. Обсяг першого розділу є дещо завеликим й перевантаженим зображеннями різних фурмених пристроїв, які можливо варто було б надати в додаток.

3. Формулювання на стр. 75 «..тиск струменя на дно реакційної зони є функцією тиску струменя на поверхню шлаку...» викликає питання про те, що саме автор приймає за дно реакційної зони, а рівно й за поверхню шлака.

4. При описі критеріїв подібності в розділі 2.1 багато формулювань починається словами «..описується (тією чи іншою формулою)...», або «...необхідно враховувати...», або «визначальними параметрами повинні бути». Принципово згодна, але до кінця не зрозуміло, так враховували, чи ні, визначальні чи ні? До того ж в таблиці 2.1. наведено тільки значення критерію динамічної подібності та модифікованого критерію Фруда. Чи розраховували інші критерії

подібності розрахункові рівняння для визначення яких наведено в розділі 2.1?

5. Встановлений моделюванням вплив збільшення відстані між ярусами 4-х та 6-ти соплових двоярусної фурми та відповідного зменшення висоти наконечника фурми над ванною на результати процесу нанесення гарнісажу є прямо протилежним (рис. 3.8 а і б). Автор не пояснює фізичного сенсу одержаного результату.

6. Автор не наводить методику розрахунку впливу тиску дозвукових газових струменів з верхнього ярусу двоярусної фурми на газошлаковий потік та не розглядає характер зміни траєкторії польоту крапель за різних умов розташування фурми тощо.

7. Автор не пояснює фізичний сенс екстремального й неоднозначного впливу добавок CaO, MgO та твердих часток MgO в шлак на величину роботи адгезії його до периклазовуглецевого вогнетриву (рис. 4.4.)

8. Обраний розмір часток оксидів для модифікування шлаку видається нетехнологічним, оскільки при їх віддачі до конвертера велика їх доля буде виноситись висхідними потоками.

9. Анонсовані в новизні методики розрахунку параметрів фурм бажано було б викласти відповідним чином, що б сприяло їх широкому використанню.

10. В акті впровадження економічний ефект розраховано для 4-х та 6-ти соплових конструкцій фурми, що є свідченням працездатності обох конструкцій. Однак бажано було б отримати відповідь автора щодо того яка з них є більш ефективною.

11. Є трохи помилок в українському тексті, «висхідний» замість «вихідний», й інші помарки; такі ж зауваження є й до англійської мови тексту анотації

Досить велика кількість зроблених опонентом зауважень та поставлених питань є показником цікавості дисертаційної роботи.

Перелічені зауваження не вносять значних коректив в суть і висновки роботи Недбайла М.М., наукова обґрунтованість, достовірність положень та висновків якої не викликає сумнівів.

Дисертаційну роботу виконано паном Недбайлом М.М. на хорошому науково-технічному рівні. Оформлення рукопису відповідає встановленим ВАК України вимогам. Дисертація написана коректною технічною мовою. Результати роботи викладені в логічній послідовності з повним і наочним поданням матеріалів, ілюстрованих малюнками і таблицями. Стиль викладення результатів забезпечує доступність їх сприйняття. Зміст автореферату є ідентичним основним положенням та результатам, які наведено в дисертації. Висновки дисертації відповідають тексту, є логічними і послідовними, та повністю відповідають виконаним дослідженням. Результати дисертаційної роботи можуть бути рекомендовані до використання на більшості інтегрованих металургійних заводів України з конвертерними цехами та за кордоном.

8. Висновок про відповідність дисертації обраній спеціальності, профілю спеціалізованої вченої ради, вимогам п. 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р.

Дисертаційна робота Недбайла М.М., яку представлено на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, є завершеним науковим дослідженням. Аналіз новизни й значущості наукових і практичних результатів, висновків і рекомендацій дозволяють стверджувати про відповідність дисертаційної роботи вимогам пунктів 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами) та нормативним документам Міністерства освіти і науки України.

Наукові і прикладні результати дисертації достатньою мірою висвітлені у 22 наукових роботах. Кількість, обсяг та рівень видання

публікацій відповідають вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України. Аналіз особистого внеску автора роботи вказує на високий ступінь самостійності виконання досліджень та публікування їх результатів.

Таким чином, на основі представленого вище оцінювання в цілому дисертаційної роботи Недбайла М. М. «Розвиток теорії та розробка ресурсозберігаючої технології нанесення шлакового гарнісажу на футерівку конвертера» вважаю, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Недбайло Микола Миколайович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Доктор технічних наук, професор,
Провідний науковий співробітник,
Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України

Г. П. Стовпченко

Підпис професора Г. П. Стовпченко засвідчую:

Вчений секретар

Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України

І.М. Клочков

