

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
ПОХВАЛІТОГО АРТЕМА АНАТОЛІЙОВИЧА

«Удосконалення випуску сталі з конвертера з одночасним розкисленням шляхом використання вуглецевого потенціалу розплаву»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

Актуальність теми дисертації та відповідність спеціальності 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

Збереження матеріальних ресурсів при виробництві сталі та висока якість металопродукції є запорукою її високої конкурентоспроможності.

Дисертаційна робота Похвалітого А.А. спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі удосконалення технології вуглецевого розкислення сталі шляхом подачі аргону в робочий простір сталевипускного каналу при випуску залізовуглецевого розплаву з конвертера, що дозволяє зменшити витрати розкислювачів при розкисленні розплаву та кількість неметалевих включень в готовій сталі.

В роботі одержали подальший розвиток теоретичні основи та наукові уявлення щодо механізму, гідрогазодинаміки і фізико-хімічних закономірностей розкислення сталі залишковим вуглецем на випуску з конвертера при вдуванні аргону у робочий простір сталевипускного каналу, що є актуальним для металургійних підприємств України та світу.

Дисертаційна робота Похвалітого А.А. у повній мірі відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

У роботі використані теоретичні та експериментальні методи досліджень. При проведенні експериментальних досліджень використано стандартне обладнання та спеціально розроблені фізичні моделі. Для опрацювання експериментальних даних, математичного моделювання процесу випуску сталі з конвертера в ківш з одночасною обробкою розплаву аргонном використані стандартні пакети прикладних програм Mathcad і Microsoft Excel.

Для визначення та удосконалення технологічних режимів обробки розплаву аргонном, розрахунку конструктивних елементів модернізованого сталевипускного каналу конвертера розроблена математична модель з використанням методу «діаграм зв'язків».

Обґрунтованість і достовірність наукових положень дисертаційної роботи базується на використанні для аналізу достатньої кількості доступних літературних джерел, патентно-ліцензійної літератури та застосуванні промислових даних, результатів власних теоретичних, практичних досліджень і розрахунків.

Наукові підходи, трактування основних положень і висновків дисертаційного дослідження, ступінь апробації та рівень публікацій основних результатів

роботи дозволяють зробити висновок про достатній ступінь обґрунтованості наукових положень, запропонованих висновків і рекомендацій.

Загальна характеристика змісту дисертації

Дисертація складається з титульного аркуша, анотації, змісту, основної частини (вступ, п'ять розділів, висновки), списку використаних джерел (107 джерел, з урахуванням публікацій автора за темою дисертації) і п'яти додатків. Матеріали дисертації викладені на 188 сторінках. Робота містить 64 рисунки, 20 таблиць та 5 додатків. За структурою дисертація та автореферат є логічними, підпорядкованими меті роботи та її завданням.

У першому розділі наведені дані щодо сучасного стану способів розкислення та випуску залізовуглецевого розплаву з кисневого конвертера.

Автором проведений критичний аналіз переваг та недоліків сучасних способів розкислення сталі. Теоретично обґрунтовано, що переваги серед відомих способів розкислення має вуглецеве, при якому продукти реакцій видаляються в газову фазу без забруднення розплаву включеннями ендогенного походження. На підставі огляду літературних джерел автором встановлено, що реалізація вуглецевого розкислення теоретично є можливою при зменшенні парціального тиску окису вуглецю при вдуванні у розплав аргону з витратою 0,4-1,2 м³/т сталі.

З використанням теоретичного аналізу умов розкислення з використанням вуглецевого потенціалу розплаву у конвертерній ванні доведено недостатню ефективність такого варіанту внаслідок наявності високоокисленого шлаку на її поверхні. У свою чергу, на етапі позаагрегатної обробки реалізація вуглецевого розкислення потребує збільшення тривалості операції продування розплаву аргонном.

Незважаючи на наявність окремих робіт, згідно з якими використання попереднього розкислення розплаву залишковим вуглецем з застосуванням аргону вважається доцільним, дані про перебіг реакцій, закономірності, механізм формування та гідрогазодинаміку газометалевого потоку (ГМП), умови його захисту від вторинного окислення атмосферним киснем при випуску плавки з конвертера у сталківші відсутні.

З урахуванням наведеного вище до основних завдань досліджень автором роботи віднесені: розробка установок та методики проведення експериментів для визначення гідрогазодинамічних закономірностей організації ГМП при вдуванні аргону у робочий простір сталевипускного каналу; теоретичне обґрунтування можливості та умов для забезпечення ефективності вуглецевого розкислення сталі на випуску залишковим вуглецем розплаву; удосконалення фізико-хімічної схеми розкислення; розробка конструкції сталевипускного каналу для реалізації вуглецевого розкислення за запропонованою схемою.

У другому розділі дисертаційної роботи представлені методики і устаткування «холодного» і високотемпературного моделювання процесу випуску розплаву з конвертера з вдуванням аргону в сталевипускний канал. Наведені критерії подібності і масштаби моделювання. Для математичного моделювання процесу випуску розплаву використаний метод «діаграм зв'язків», з метою розрахунку та обґрунтування конструктивних елементів сталевипускного каналу і технологічних режимів обробки розплаву аргонном.

У третьому розділі дисертації представлені результати досліджень, проведених з використанням розробленої методики і устаткування «холодного» моделювання гідрогазодинамічних закономірностей та умов формування газометалевого потоку, захисту останнього при випуску з конвертера, особливості використання нових конструкцій сталевипускних каналів, оснащених соплами для вдування захисного газу.

За результатами експериментів встановлено, що при обробці розплаву газом в робочому просторі сталевипускного каналу в дослідженому діапазоні існує критична витрата газу, при перевищенні якої кут розкриття потоку перманентно зростає, що призводить до погіршення організації потоку. Встановлено, що збільшення кута розкриття газорідного потоку призводить до зменшення ефективності захисної дії аргону. При збільшенні кута розкриття газорідного потоку з $1-3^\circ$ до 10° ефективність захисної дії аргону зменшується з 0,99 до 0,72. Без використання аргону, навіть при значенні $\alpha = 0^\circ$, вміст кисню у спливаючих у ковшовій ванні пухирцях, знаходився на рівні 21%. Показано, що при відносній довжині реакційної зони у каналі 0,75 коефіцієнт ефективності захисної дії оболонки аргону дорівнює 0,89-0,99.

За результатами досліджень дисертантом запропонована класифікація режимів продувки потоку газом у сталевипускному каналі в залежності від кута нахилу газових струменів (γ), які вдуваються в робочий простір останнього: режим «розімкнення», режим «змикання»; режим «пробою». Раціональним визнано використання другого режиму, при реалізації якого газові потоки об'єднуються, а збільшення витрат газу призводить до зменшення кута нахилу газових струменів і формування газометалевого потоку з розвиненою міжфазною поверхнею і ступенем організації на рівні 0,94-0,98.

У розділі представлені також результати математичного моделювання процесу випуску плавки із використанням методу «діаграм зв'язків» у формі диференціальних рівнянь для системи «ванна конвертера – сталевипускний канал», розраховані значення коефіцієнтів питомих витрат рідини для дослідних конструкцій сталевипускних каналів при різних витратах газу, що вдувається у потік рідини.

Четвертий розділ присвячений опису особливостей та аналізу результатів високотемпературних досліджень закономірностей розкислення потоку залізо-вуглецевого розплаву з різним початковим вмістом залишкового вуглецю у сталевипускному каналі при вдуванні аргону у потік.

За результатами досліджень з використанням високовуглецевого розплаву, встановлено, що при вдуванні аргону на виході з каналу формується газометалевий потік з різним кутом розкриття. Останній залежить від питомої витрати аргону, що відповідає результатам «холодного» моделювання. Дослідженнями підтверджена актуальність захисту металевого потоку від впливу кисню атмосфери шляхом підвищення ступеню організації ГМП та створення умов для формування захисної газової оболонки.

Експериментально підтверджена можливість реалізації попереднього вуглецевого розкислення за рахунок обробки нерозкисленого низьковуглецевого розплаву у сталевипускному каналі. Підтверджено, що при збільшенні початкового вмісту вуглецю у розплаві частка видаленого кисню збільшується. Встановлено, що при обробці розплаву з початковим вмістом вуглецю 0,033-0,050%

частка видаленого кисню становить 12-19 % (відн.), а зниження чаду алюмінію на розкислення - 14-20 %.

За результатами високотемпературного моделювання і термодинамічного аналізу розвитку реакцій при випуску розплаву з одночасною обробкою аргоном запропонована фізико-хімічна схема розкислення металевого розплаву залишковим вуглецем. На відміну від відомих моделей, згідно до запропонованої автором схеми процеси видалення розчиненого кисню з розплаву, відбуваються як у робочому просторі сталевипускного каналу, так і у відкритій частині ГМП і у стальковші. Реалізація механізму розкислення ґрунтується на утворенні розвинутої міжфазної поверхні потоку, забезпеченні зниження парціального тиску окису вуглецю та термодинамічних умов для протікання реакцій зневуглецювання при вдуванні аргону в потік.

У п'ятому розділі представлені результати промислових досліджень, технологія та конструкція сталевипускного каналу для реалізації розкислення розплаву залишковим вуглецем.

Розроблена методика визначення взаємозв'язків об'єму, площі поверхні й рівня шлакометалевої ванни конвертера, яка придатна для розрахунку зміни гідравлічного напору в процесі випуску. Показано, що на відміну від плавної динаміки зменшення площі поверхні розділу між металом і шлаком протягом випуску 80-90% металевого розплаву, на останніх 10-20% виникає різке зменшення площі його поверхні, що призводить до воронкоутворення і затягування шлаку у сталевипускний канал.

На основі виконаних теоретичних і експериментальних досліджень дисертантом розроблена і обґрунтована нова конструкція сталевипускного каналу. Раціональним співвідношенням діаметрів камер модернізованого сталевипускного каналу для умов ПАТ «ДМК», визнано 1,2-1,5 при відносній довжині реакційної зони (другої камери) у 0,25-0,75 від повної довжини каналу. Рекомендовані значення діаметрів та довжин сталевипускного каналу складають: для першої камери 150 мм та 400 мм і другої камери 180-200 мм та 1500 мм відповідно при витраті аргону 0,7-2,8 м³/(т·год). Запропоновані конструкції кільцевих блоків сталевипускного каналу, оснащених 24 і 8 соплами. Конструкція блоку на 24 сопла призначена для першого періоду кампанії конвертера по футерівці при наявності потужного гідравлічного напору для забезпечення ступеня організації ГМП з мінімальним кутом розкриття. При зменшенні довжини каналу з 2000 мм до 1200 мм може бути використана конструкція 8-ми соплового блоку.

Доведено, що для зменшення концентрації розчиненого кисню необхідним є формування потоку з розміром крапель не більше 5-7 мм. Максимізації ефекту використання вуглецевого потенціалу можна досягти при формуванні потоку з краплями не більше 3-4 мм. У такому випадку, в умовах конвертерного цеху ПАТ «ДМК» зменшення окисленості розплаву від реалізації вуглецевого розкислення при вдуванні аргону на випуску може скласти 50-250 ppm.

Встановлено, що при концентрації вуглецю перед випуском більше 0,040 % зменшення окисленості розплаву після обробки аргоном складає 10-30 %. При концентрації вуглецю перед випуском менше 0,040% зменшення окисленості складає 4-10 %. Таким чином, за ствердженнями автора дисертації, для ефективного вуглецевого розкислення концентрація залишкового вуглецю у розплаві повинна бути не нижче 0,040 %.

Очікуваний економічний ефект від застосування запропонованої технології для умов конвертерного цеху ПАТ «ДМК», за рахунок зменшення витрати розкислювачів на розкислення у сталюковші, в залежності від початкового вмісту вуглецю, складає 4,3 млн. грн. на рік.

У цілому, структура дисертації свідчить про логічно правильний та у достатньому ступеню аргументований виклад матеріалу з використанням загальноновизнаної технічної термінології та належному оформленні.

Наукова новизна отриманих результатів

В результаті теоретичного обґрунтування та експериментальних досліджень отримані нові дані щодо механізму, гідрогазодинаміки і фізико-хімічних закономірностей розкислення сталі залишковим вуглецем на випуску з конвертера при вдуванні аргону у робочий простір сталевипускного каналу. До найбільш суттєвих, з наукової точки зору, результатів дисертації Похвалітого А.А. можна віднести наступне:

1. Уперше доведено, що при обробці розплаву газом в робочому просторі сталевипускного каналу в дослідженому діапазоні існує критична витрата газу, перевищення якої призводить до зміни ступеня організації газометалевого потоку, який є функціональною залежністю кута його розкриття, і тривалості випуску сталі. Встановлено, що при витраті газу нижче критичної для запропонованих одно- і двокамерної конструкції сталевипускного каналу тривалість випуску розплаву змінюється в 1,3-3,0 і 0,9-1,4 рази відповідно, а ступінь організації потоку складає 0,94-0,99. При перевищенні критичної витрати газу вплив на подальше збільшення тривалості випуску незначний, ступінь організації потоку зменшується до 0,72-0,83 і 0,83-0,88 відповідно для одно- і двокамерного сталевипускного каналу.

2. Уперше запропоновано класифікацію режимів продувки газом потоку розплаву у сталевипускному каналі в залежності від кута нахилу газових струменів (γ), які вдуваються в робочий простір останнього:

– режим «розімкнення» ($\gamma > 78^\circ$), при реалізації якого газові струмені не занурюються в метал і формування газометалевого потоку не відбувається (ступінь організації потоку складає 0,99-1,00);

– режим «змикання» ($0 < \gamma < 78^\circ$), при реалізації якого газові потоки об'єднані, збільшення витрати газу призводить до зменшення кута нахилу газових струменів та формування газометалевого потоку з розвиненою міжфазною поверхнею і ступенем організації в межах 0,94-0,98;

– режим «пробою» ($\gamma = 0^\circ$), при якому подальше збільшення витрати газу призводить до диспергування розплаву і руху газометалевого потоку у дисперсно-кільцевому режимі зі зменшенням ступеня організації потоку до 0,72-0,93.

3. Доведено, що за межами сталевипускного каналу відбувається поступове витискання аргону з газометалевого потоку на периферію, що забезпечує формування захисної газової оболонки по всій довжині потоку за умов високого ступеня організації останнього. Встановлено, що при збільшенні кута розкриття газометалевого потоку від 1° до 10° ефективність захисної дії аргону зменшується з 0,99 до 0,72. При відносній довжині реакційної зони у каналі у 0,75 од. коефіцієнт ефективності захисної дії оболонки аргону складає 0,89-0,99.

4. З використанням високотемпературного моделювання уперше встановлено, що при випуску розплаву крізь однокамерний сталевипускний канал при

витраті аргону $0,05 \text{ м}^3/\text{хв.}$ на одне сопло кут розкриття газометалевого потоку складає $10-15^\circ$ і захисна дія аргону відсутня. Показано, що раціональний режим обробки забезпечується використанням двокамерного сталевипускного каналу з кутом розкриття газометалевого потоку $1-3^\circ$ при витраті аргону $0,05 \text{ м}^3/\text{хв.}$ на одне сопло. Встановлено, що при вдуванні аргону у потік розплаву з початковим вмістом вуглецю $0,033-0,050 \%$ частка видаленого кисню складає $12-19 \%$, а зменшення чаду алюмінію на розкислення розплаву у сталюковші – $14-20 \%$ відповідно.

5. Отримали подальший розвиток наукові уявлення щодо фізико-хімічної схеми вуглецевого розкислення сталі, згідно з якою процеси видалення кисню при вдуванні аргону у сталевипускний канал відбуваються як у робочому просторі каналу, так і у відкритій частині газометалевого потоку і у сталюковші. Реалізація механізму розкислення сталі ґрунтується на утворенні розвиненої міжфазної поверхні у газометалевому потоці, забезпеченні зменшення парціального тиску окису вуглецю та термодинамічних умов для самовільного протікання реакції розкислення при вдуванні аргону в потік розплаву у робочому просторі сталевипускного каналу.

Практичне значення отриманих результатів

Представлені в дисертації результати і рекомендації розширюють технологічні та ресурсозберігаючі можливості етапу випуску розплаву з конвертера в сталюковші.

Розроблена математична модель з використанням методу «діаграм зв'язків» придатна для визначення технологічних режимів обробки розплаву аргонном і розрахунку конструктивних елементів сталевипускного каналу.

Розроблена методика визначення взаємозв'язків об'єму, площі поверхні й рівня шлакометалевої ванни конвертера, яка придатна для виконання розрахунків зміни гідравлічного напору в процесі випуску розплаву. Показано, що на відміну від плавної динаміки зменшення площі поверхні розділу між металом і шлаком протягом випуску $80-90\%$ розплаву на останніх $10-20\%$ виникає різке зменшення площі його поверхні, що призводить до воронкоутворення і затягування шлаку у сталевипускний канал.

Запропонована конструкція двокамерного сталевипускного каналу кисневого конвертера для реалізації обробки потоку розплаву аргонном на випуску. Раціональним співвідношенням діаметрів камер каналу визнано $1,2-1,5$, а відносна довжина реакційної зони (другої камери) – $0,25-0,75$ від повної довжини каналу при витраті аргону $0,7-2,8 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{год})$. Очікуваний економічний ефект при реалізації запропонованої технології для умов конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» складає $4,3$ млн. грн. на рік (2 грн./т сталі).

Запропоновані автором методики і принципи моделювання випуску сталі з конвертера з одночасним розкисленням шляхом використання вуглецевого потенціалу розплаву дозволяють зменшити витрату розкислювачів і підвищити ступінь очищення заготовок від неметалевих включень.

Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в наукових публікаціях

Основні результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на 7 науково-технічних конференціях, в т.ч. 6-ти міжнародних. Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 16 роботах, в тому числі: 6 – статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК України, 1 з яких опублікована у виданні, що індексується у науково-метричній базі Scopus, 1 – стаття у періодичному виданні, 2 – патенти України.

Публікації в достатній мірі відображають основні положення дисертації. Кількість та якість публікацій відповідає вимогам, які пред'являють до дисертацій на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук.

Автореферат дисертації містить всю необхідну інформацію для оцінки дисертації, цілком ідентичний роботі, включає основні наукові положення, висновки і рекомендації, які приведені у дисертації.

Основні зауваження до дисертації

1. У висновках дисертації на стор. 162 декларується зменшення забрудненості розплаву неметалевими включеннями ендogenous походження в результаті застосування запропонованої дисертантом технології розкислення. Однак не наведена методика оцінки та кількісні показники вказаного зменшення.

2. Необхідним є додаткове пояснення щодо доцільності введення та використання терміну «поріг» (стор. 87, 162) для позначення критичної витрати газу, перевищення якої веде до зміни ступеня організації газометалевого потоку.

3. Автор роботи наполягає на необхідності забезпечення формування газометалевого потоку з краплями не більше 3-4 мм упродовж усього випуску плавки (стор. 156) для досягнення максимального ефекту вуглецевого розкислення. Яким чином, за думкою автора можливо забезпечити дотримання таких вимог на промислових конвертерах?

4. На мою думку застосування терміну «реакційна зона» при використанні нейтрального газу не зовсім коректно. У такому випадку він не відображає сутність процесів, які відбуваються в робочому просторі сталевипускного каналу при вдуванні аргону в потік розплаву. Напевно, більш доцільним було б використання терміну «зона формування міжфазної поверхні».

5. На стор. 113, 114 правильним є визначення «зміни енергії Гіббса», а не «енергія Гіббса».

6. Відсутні дані яким чином застосування ускладненої конструкції продувального блоку сталевипускного каналу (стор. 150) впливатиме на стійкість вузла випуску розплаву з конвертера?

7. Не зовсім зрозуміло чим обумовлена тривалість обробки краплі розплаву аргонном в межах 0,5-1,5 сек.? Чи є можливість збільшити тривалість обробки аргонном краплі розплаву у промислових умовах?

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, не знижують її теоретичної та практичної цінності, не зменшують значимість основних наукових положень та висновків, що винесені на захист.

Висновки щодо відповідності дисертації вимогам Міністерства освіти та науки України

Основні наукові положення, які приведені у дисертаційній роботі, висновки і рекомендації є обґрунтованими, оскільки базуються на теоретичному аналізі та результатах виконаних лабораторних експериментів та промислових досліджень. Отримані результати і рекомендації характеризуються новизною, виконані експерименти - оригінальністю підходу.

Дисертаційна робота Похвалітого Артема Анатолійовича є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що сприяють вирішенню актуальної задачі вдосконалення технології розкислення металевого розплаву при його випуску з конвертора шляхом подачі аргону в робочий простір сталевипускного каналу, що забезпечує використання розкислювального потенціалу вуглецю розплаву.

Вважаю, що рецензована дисертаційна робота за своєю вагомістю, новизною наукових результатів, їх практичним значенням, кількістю та обсягом публікацій відповідає вимогам п.п. 9; 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо кандидатських дисертацій, а автор дисертаційної роботи – Похвалітий Артем Анатолійович заслуговує на присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 - Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент

Заступник директора з наукової роботи
Інституту чорної металургії
ім. З.І. Некрасова НАН України
доктор технічних наук,
старший науковий співробітник



[Handwritten signature of O.S. Vergun]

О.С. Вергун

Підпис д.т.н. Вергуна О.С. засвідчую
Вчений секретар, к.т.н.

[Handwritten signature of O.E. Merkulov]

О.Є. Меркулов