

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

ПОХВАЛІТИЙ АРТЕМ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 669.141.245:669:66.046.55

**УДОСКОНАЛЕННЯ ВИПУСКУ СТАЛІ З КОНВЕРТЕРА З
ОДНОЧАСНИМ РОЗКИСЛЕННЯМ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ
ВУГЛЕЦЕВОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОЗПЛАВУ**

05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового
ступеня кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис
Робота виконана в Дніпровському державному технічному університеті
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Сігарьов Євген Миколайович,
Дніпровський державний
технічний університет (м.Кам'янське),
завідувач кафедри металургії чорних
металів ім. професора В.І.Логінова

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Вергун Олександр Сергійович,
Інститут чорних металів ім. З.І. Некрасова
НАН України (м.Дніпро)
заступник директора з наукової роботи

кандидат технічних наук, доцент
Костецький Юрій Віталійович,
Інститут електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України (м.Київ)
старший науковий співробітник відділу
фізико-металургійних проблем
електрошлакових технологій

Захист відбудеться «_____» _____ 2018 р. о _____ на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 при Національній
металургійній академії України за адресою: 46000, м.Дніпро, пр. Гагаріна, 4.
Факс +38(0562)47-44-61. E-mail: lydmila_kamkina@ukr.net

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національної
металургійної академії України за адресою: 46000, м.Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розіслано: «_____» _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.03
доктор технічних наук,
професор

Л.В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Удосконалення способів розкислення сталі з підвищенням ресурсозберігаючої ефективності та забезпеченням високої якості металопродукції у сировинних умовах металургійної галузі України залишається актуальним завданням. Прийнятою на більшості металургійних підприємств технологією розкислення сталі передбачається використання металевих розкислювачів та феросплавів (Al, FeSi, FeMn та ін.), продукти реакції яких, у вигляді неметалевих включень, частково залишаються в об'ємі розплаву і є однією з причин виникнення дефектів у готовій металопродукції.

Значний внесок у розвиток теорії та наукових уявлень щодо термодинамічних, кінетичних закономірностей та механізму розкислення сталі зробили відомі вчені проф. Смірнов О.М., Самарін О.М., Бойченко Б.М., Яковлев Ю.М., Охотський В.Б., Камкіна Л.В., Ростовцев С.Т., Казачков Є.О., Кудрін В.О. та інші.

Аналіз літературних джерел підтверджує доцільність подальшого розвитку наукових уявлень, теоретичного обґрунтування та лабораторно-промислового відпрацювання вуглецевого розкислення на випуску з конвертера шляхом використання вуглецевого потенціалу розплаву. Інформація щодо лабораторних або промислових досліджень у цьому напрямку у доступних джерелах вкрай обмежена.

У зв'язку з цим дослідження, спрямовані на вивчення гідрогазодинамічних і фізико-хімічних закономірностей обробки розплаву інертним газом у сталевипускному каналі конвертера є актуальним питанням для удосконалення випуску розплаву з конвертера і підвищення ресурсоефективності технології розкислення сталі.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є дослідження та розвиток теоретичних основ і наукових уявлень щодо механізму, гідрогазодинаміки і фізико-хімічних закономірностей та відпрацювання ресурсозберігаючої технології вуглецевого розкислення сталі на випуску з конвертера з обробкою розплаву аргоном в робочому просторі сталевипускного каналу.

Для досягнення поставленої мети в дисертаційній роботі передбачалося вирішення наступних задач:

- виконати аналіз сучасного стану технології розкислення сталі, умов і можливості реалізації вуглецевого розкислення при вдуванні у розплав інертного газу в процесі випуску з конвертера;

- розробити комплекс лабораторного устаткування та методики дослідження механізму та закономірностей використання аргону в робочому просторі сталевипускного каналу, умов формування та структури газорідного потоку;

- визначити вплив конструкції удосконаленого сталевипускного каналу (діаметр і довжина реакційної зони, кількість і місце розташування сопел для вдування аргону) на тривалість випуску, ступінь організації і умови захисту газометалевого потоку від впливу атмосферного кисню;

- обґрунтувати класифікацію режимів продувки аргоном потоку розплаву

у сталевипускному каналі та визначити раціональну витрату аргону для реалізації розкислення розплаву залишковим вуглецем;

- удосконалити фізико-хімічну схему розкислення розплаву залишковим вуглецем на випуску з сталеплавильного агрегату з врахуванням особливостей формування газометалевого потоку;

- з використанням методів математичного моделювання дослідити гідрогазодинаміку системи «ванна конвертера – сталевипускний канал» із вдуванням аргону при випуску розплаву у стальківш;

- розробити методіку розрахунку зміни геометричних параметрів робочого простору конвертера по ходу кампанії останнього по футерівці і визначити їх вплив на умови випуску розплаву в стальківш;

- обґрунтувати конструктивне оформлення модернізованого сталевипускного каналу та технологію вуглецевого розкислення сталі залишковим вуглецем в процесі випуску;

- обґрунтувати економічну ефективність застосування запропонованої технології розкислення сталі.

Об'єкт дослідження. Процес випуску залізுவуглецевого розплаву з конвертера у стальківш з вдуванням аргону в робочий простір сталевипускного каналу.

Предмет дослідження. Фізико-хімічні, гідрогазодинамічні і тепломасообмінні закономірності формування газометалевого потоку в процесі випуску сталі з конвертера при вдуванні аргону в робочий простір сталевипускного каналу для розкислення розплаву за рахунок його вуглецевого потенціалу; конструкції сталевипускних каналів, оснащених багатосопловими продувними блоками; режими вдування аргону в сталевипускний канал; вплив ступеня організації газометалевого потоку на захисну дію аргону; вплив хімічного складу розплаву на перебіг та ступінь вуглецевого розкислення.

Методи дослідження. Для виконання поставлених завдань в дисертаційній роботі використані: теоретичний і термодинамічний аналіз, методіки «холодного» і високотемпературного моделювання, удосконалені методіки дослідження закономірностей взаємного впливу профілю сталевипускного каналу і витрат аргону на ступінь організації потоку; розрахункові методи для визначення впливу конфігурації робочого простору агрегату на параметри випуску розплаву; методи математичного моделювання.

Наукова новизна отриманих результатів.

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.

До цього часу дані стосовно критичної витрати газу та впливу її на ступінь організації газометалевого потоку відомі не були.

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.

До цього часу відомості щодо режимів продувки потоку розплаву газом у сталевипускному каналі з метою утворення розвиненої міжфазної поверхні, з врахуванням кута нахилу газових струменів, які вдуваються в потік, були відсутні.

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.

До цього часу відомості відносно впливу кута розкриття газометалевого потоку на ефективність захисної дії аргону відомі не були.

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 стальковші – 14-20% відповідно.

Відомості відносно впливу параметрів газометалевого потоку при використанні аргону на умови розкислення розплаву залишковим вуглецем були відсутні.

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 стальковші. 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.

Практична цінність отриманих результатів.

1. Для дослідження взаємного впливу тривалості випуску, ступеня організації газорідного потоку і захисного ефекту продувального газу розроблена авторська методика та установка низькотемпературного моделювання процесу випуску рідини з моделі конвертера з формуванням газорідного потоку у робочому просторі сталевипускного каналу.

2. Для визначення гідрогазодинамічних закономірностей організації газометалевого потоку і особливостей розкислення залишковим вуглецем розплаву при вдуванні аргону у робочий простір сталевипускного каналу розроблена авторська методика високотемпературного моделювання випуску розплаву з конвертера.

3. Розроблена математична модель з використанням методу «діаграм зв'язків» придатна для визначення технологічних режимів обробки розплаву аргонем і розрахунку конструктивних елементів сталевипускного каналу. За результатами чисельного моделювання встановлено, що коефіцієнт питомих витрат розплаву для запропонованої конструкції двокамерного сталевипускного каналу знаходиться в межах від 0,82-0,87 до 0,58-0,79, для однокамерного – від 0,7 до 0,38-0,45 і має тенденцію до зменшення при збільшенні витрати аргону.

4. 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% металевого розплаву на останніх 10-20% виникає різке зменшення площі його поверхні, що призводить до воронкоутворення і затягування шлаку у сталевипускний канал.

5. Запропонована конструкція двокамерного сталевипускного каналу кисневого конвертера для реалізації обробки потоку розплаву аргонем на випуску. Раціональним співвідношенням діаметрів камер каналу є 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 м³/(т·год).

6. Очікуваний економічний ефект при реалізації запропонованої технології для умов конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» складає 4311789 грн. на рік (2 грн./т сталі).

7. Розроблені в дисертаційній роботі методики використовуються на кафедрі металургії чорних металів Дніпровського державного технічного університету в навчальному процесі при читанні дисциплін «Металургія чорних металів», «Технології ресурсозбереження в металургії», а також при виконанні студентами випускних дипломних і магістерських робіт.

Особистий внесок дисертанта. Дисертація є самостійною роботою автора, що базується на опублікованих результатах досліджень. Результати опубліковано у співавторстві зі співробітниками кафедри металургії чорних металів ДДТУ [1-16]. Особистий внесок здобувача полягає в: проведенні теоретичних досліджень можливості використання вуглецевого потенціалу розплаву для розкислення сталі у сталевипускному каналі [1-3, 11, 12, 14, 16]; розробці методик і устаткування для «холодного» [2, 3] і високотемпературного [7] моделювання; обробці експериментальних даних, що дозволило розробити рекомендації стосовно раціональних конструкцій сталевипускного каналу і витрати аргону, які є найбільш доцільними для захисту і розкислення залізобуглецевого розплаву [2, 3, 6-9]; отриманні результатів математичного моделювання системи «ванна конвертера – сталевипускний канал» з використанням методу «діаграм зв'язків» для розрахунку впливу конструктивних елементів сталевипускного каналу на процес випуску плавки [4, 5, 15]; розробці методики визначення взаємозв'язків об'єму, площі поверхні й рівня шлакометалевої ванни конвертера, яка придатна для виконання розрахунків зміни гідравлічного напору в процесі випуску розплаву [10]; розробці і теоретичному обґрунтуванню механізму реалізації розкислення залишковим вуглецем розплаву при використанні аргону [13]; розробці режимів обробки розплаву аргонем і конструкції двокамерного сталевипускного каналу для 250-т промислового конвертера [7, 9].

Автор висловлює подяку к.т.н., доц. Кулику А.Д. і к.т.н., доц. Чубіну К.І. за участь в організації і проведенні складних експериментів.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розглянуті в дисертаційній роботі питання і задачі є результатами досліджень, які виконані автором в рамках науково-дослідних робіт «Дослідження і вдосконалення процесів позаагрегатної обробки сталі і їх вплив на вихід придатної і якісної металопродукції» (№ДР 0114U005605) і «Дослідження та вдосконалення процесів конвертерного виробництва сталі в умовах дефіциту металобрухту і підвищених вимог до якості металопродукції» (№ДР 0116U005922).

Дисертаційна робота виконана у відповідності до напрямків наукових досліджень кафедри металургії чорних металів Дніпровського державного технічного університету.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і результати дисертації представлені в доповідях на: XXV ювілейній Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний потенціал світової науки – XXI сторіччя», м.Запоріжжя, 3-7 березня 2014 р.; XXXV Міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційний потенціал світової науки – XXI сторіччя», м.Запоріжжя, 24-27 листопада 2015 р.; XII Міжнародній науково-практичній конференції «Лиття. Металургія. 2016» м.Запоріжжя, 24-26 травня 2016 р.; XII Міжнародній конференції «Стратегія якості в промисловості і освіті» м.Варна, Болгарія, 30 травня – 2 червня 2016 р.; Молодіжній науково-технічній конференції «Молода академія 2016». (м.Дніпропетровськ, 1 червня 2016 р.); VIII Молодіжній Міжнародній конференції молодих вчених «Молоді вчені – від теорії до практики». (м.Дніпро, 17 лютого 2017 р.); VI Міжнародній науково-практичній конференції «Металургія 2017» (м.Запоріжжя, 23-25 травня 2017 р.).

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових

праць, у 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, 7 – матеріали наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. 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.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи, вказані мета і завдання дослідження, сформульована наукова новизна отриманих результатів та їх практичне значення, відзначено особистий внесок автора, викладені результати апробації розробок, наведена структура і обсяг роботи.

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

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 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.

Дослідженнями закономірностей розкислення з використанням вуглецевого потенціалу розплаву у конвертерній ванні доведено недостатню ефективність внаслідок наявності високоокисленого шлаку на її поверхні. У свою чергу, на етапі позаагрегатної обробки реалізація вуглецевого розкислення потребує збільшення тривалості операції продування розплаву аргонном. Відомі роботи, в яких показана доцільність розробки способу попереднього розкислення залишковим вуглецем розплаву шляхом вдування аргону в робочий простір сталевипускного каналу. В той же час дані про перебіг реакцій, закономірності, механізм формування, гідрогазодинаміку газометалевого потоку (ГМП) і умови його захисту від вторинного окислення при випуску плавки з конвертера відсутні.

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

У **другому розділі** представлені методика і устаткування для низькотемпературного моделювання процесу випуску рідини з моделі конвертера (рис. 1). Використана модель сталевипускного каналу 250-т промислового конвертера ПАТ «ДМК» в масштабі 1:5 з дотриманням критеріїв гідродинамічної подібності $We=idem$, $Fr=idem$, $Ho=idem$ (за критерієм Re автотомельність). У якості середовищ, що моделюють металевий розплав і аргон, використовувалися відповідно вода, компресорне повітря та аргон.

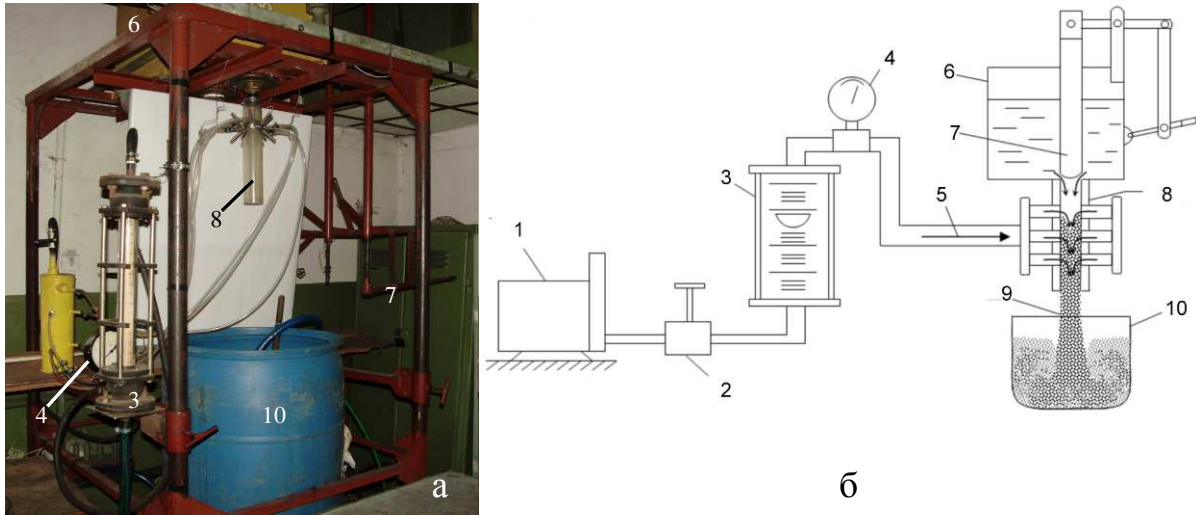


Рис. 1 – Вигляд (а) та схема (б) лабораторної установки моделювання випуску рідини з моделі конвертера при вдуванні газу в робочий простір сталевипускного каналу: 1 – компресор; 2 – регулюючий вентиль; 3 – ротаметр; 4 – манометр; 5 – продувний газ; 6 – ємність, що моделює конвертер; 7 – стопорний механізм; 8 – змінний випускний канал з продувними вузлами; 9 – газорідинний потік; 10 – ківш

Для вдування газу у потік рідини в процесі випуску з моделі конвертера витрата повітря складала від 0,1 до 0,6 м³/хв., що відповідає витраті аргону для 250-т конвертера від 2,5 до 25 м³/хв. або від 0,1 до 1,0 м³/т сталі. Використані моделі одно- і двокамерного сталевипускного каналу циліндричної форми (рис. 2, а, б), і модель каналу прямокутної форми з прозорими стінками (рис. 2, в). Моделі сталевипускних каналів були оснащені продувними блоками на 2, 4 і 6 циліндричних сопла діаметром 1,8-2,3 мм, розташованими у бокових стінках каналу.

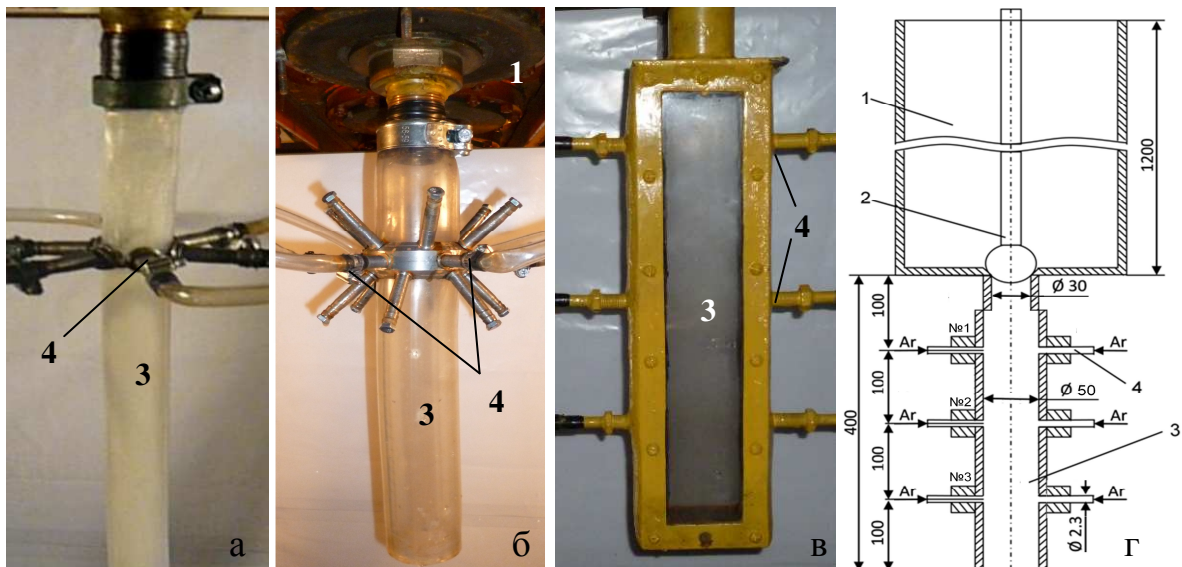


Рис. 2 – Моделі одно- (а) і двокамерного (б) сталевипускного каналу циліндричної форми, модель каналу прямокутної форми з прозорими стінками (в) і схема розташування продувних блоків (г): 1 – ємність, яка моделює конвертер; 2 – стопор; 3 – модель сталевипускного каналу; 4 – сопло для вдування газу у потік рідини; №1, №2, №3 – номери ярусів (блоків) газових сопел

Високотемпературне моделювання випуску розплаву у стальківш з одночасним вдуванням аргону у потік проводили з використанням модельного стенду «сталевипускний канал – ківш». У складі останнього послідовно розташовані у технологічну лінію: індукційна тигельна піч типу ICT-0,16; 100 кг ківш, оснащений кришкою і кисневою фурмою для одержання розплаву із заданим вмістом вуглецю та температурою; модель сталевипускного каналу у масштабі 1:5 і стальківш (рис. 3).

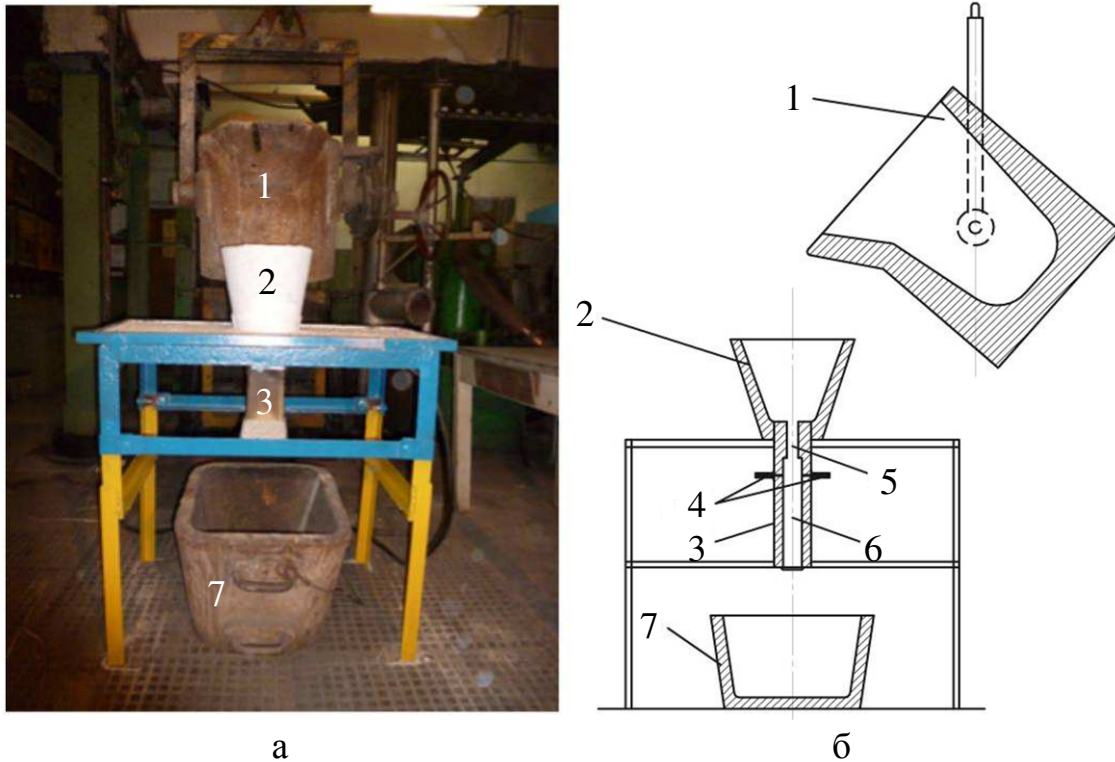


Рис. 3 – Вигляд (а) та схема (б) частини технологічної лінії стенду для моделювання випуску металевого розплаву крізь сталевипускний канал із одночасним вдуванням аргону в потік розплаву: 1 – сталерозливний ківш; 2 – проміжна ємність, що моделює рівень металу в конвертері на випуску; 3 – модель сталевипускного каналу; 4 – продувні сопла; 5 – перша камера сталевипускного каналу; 6 – друга камера сталевипускного каналу (розширена); 7 – ківш

Сталевипускний канал було оснащено продувним блоком на 2 і 4 циліндричних сопла діаметром 2,3 мм, розташованими в боковій стінці у реакційній зоні з відносною довжиною $l_i/l_0 = 0,75$ від повної довжини каналу (l_0), де l_i – довжина реакційної зони, м. В якості моделюючих речовин використовували низько- і високовуглецевий розплав та аргон.

Для математичного моделювання процесу випуску розплаву використали метод «діаграм зв'язків», з метою розрахунку та обґрунтування конструктивних елементів сталевипускного каналу і технологічних режимів обробки розплаву аргоном.

У третьому розділі представлені результати досліджень з визначення гідрогазодинамічних закономірностей та умов формування газометалевого потоку і захисту останнього при випуску розплаву з конвертера.

Виявлено, що при обробці розплаву газом в робочому просторі

сталевипускного каналу в дослідженому діапазоні існує «поріг» – критична витрата газу, перевищення якої призводить до зміни ступеня організації ГМП, який є функціональною залежністю кута його розкриття (α), і тривалості випуску сталі.

Встановлено, що при витраті газу нижче критичної для одно- і двокамерного (рис. 4 а, б) 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 ($\alpha = 1-3^\circ$). При перевищенні критичної витрати газу вплив на подальше збільшення тривалості випуску незначний, ступінь організації потоку зменшується до 0,72-0,83 ($\alpha = 15-25^\circ$) і 0,83-0,88 ($\alpha = 10-15^\circ$) відповідно для одно- і двокамерного сталевипускного каналу.

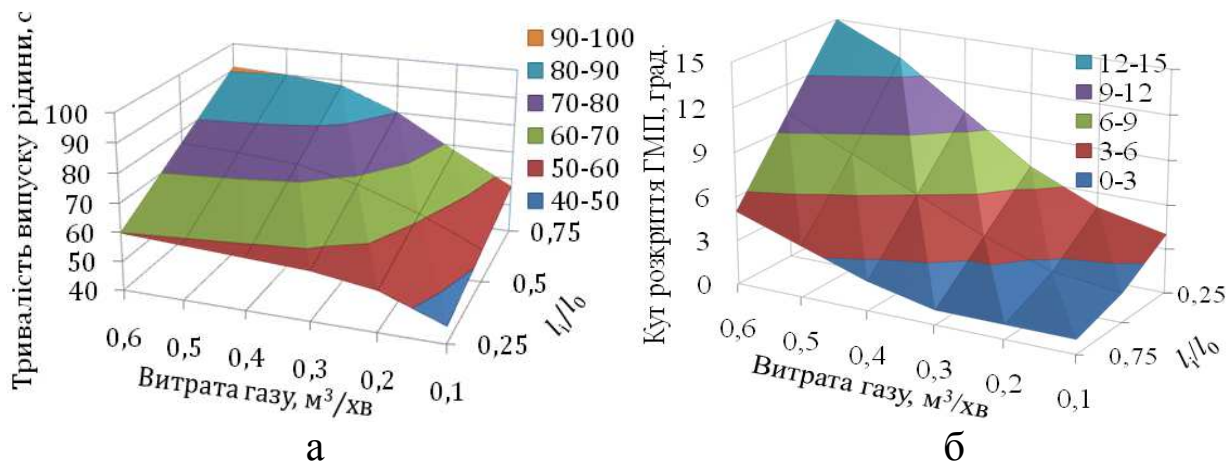


Рис. 4 – Вплив витрати нейтрального газу та довжини реакційної зони на тривалість випуску (а) і кут розкриття ГМП (б) для двокамерного каналу

За результатами серії експериментів отримані математичні залежності (1) і (2), які характеризують тривалість випуску (τ) і кут розкриття ГМП (α) для двокамерного каналу:

$$\tau = -167,8 \frac{l_i}{l_0} Q_g^2 - 34,8 Q_g^2 + 207,7 \frac{l_i}{l_0} Q_g + 26,36 Q_g - 0,6 \frac{l_i}{l_0} + 40; \quad (1)$$

$$\alpha = 16,1 \frac{l_i}{l_0} Q_g^2 + 11 Q_g^2 - 41,8 \frac{l_i}{l_0} Q_g + 23,7 Q_g + 1,3 \frac{l_i}{l_0} + 1. \quad (2)$$

Доведено, що збільшення кількості продувних вузлів (рис. 2) зменшує питому витрату газу на одне сопло ($Q_{g,1}$) і сприяє пом'якшенню режиму продувки і формуванню газорідинного потоку з розвиненою міжфазною поверхнею та підвищеним ступенем організації. Залежність кута розкриття ГМП від $Q_{g,1}$ при різній довжині реакційної зони представлена виразом:

$$\alpha = -160 \cdot Q_{g,1} \cdot \frac{l_i}{l_0} + 160 \cdot Q_{g,1} + 4 \cdot \frac{l_i}{l_0} - 4. \quad (3)$$

Для оцінки впливу ступеня організації газорідинного потоку на утворення захисної газової оболонки від впливу атмосфери провели дослідження з використанням аргону.

Встановлено, що збільшення кута розкриття газорідинного потоку призводить до зниження ефективності захисної дії аргону. При збільшенні кута

розкриття газорідинного потоку з $1-3^\circ$ до 10° ефективність захисної дії аргону зменшується з 0,99 до 0,72 (рис. 5). Без використання аргону, навіть при значенні $\alpha = 0^\circ$, вміст кисню у спливаючих у ковшовій ванні пузирях знаходився на рівні 21%. При відносній довжині реакційної зони у каналі 0,75 коефіцієнт ефективності захисної дії оболонки аргону дорівнював 0,89-0,99 (рис. 5). За результатами досліджень запропоновані математичні вирази для визначення вмісту кисню у газовій оболонці (4) і ефективності захисної дії аргону (5):

$$\{O_2\} = 13,9 \frac{l_i}{l_0} Q_g^2 + 3,5 Q_g^2 - 33,9 \frac{l_i}{l_0} Q_g + 19,6 Q_g + 1,14 \frac{l_i}{l_0} + 1 \quad (4)$$

$$K_{Ar} = (100 - ((100 \cdot \{O_2\} - \{O_2\}_{Ar}) / 21)) / 100, \quad (5)$$

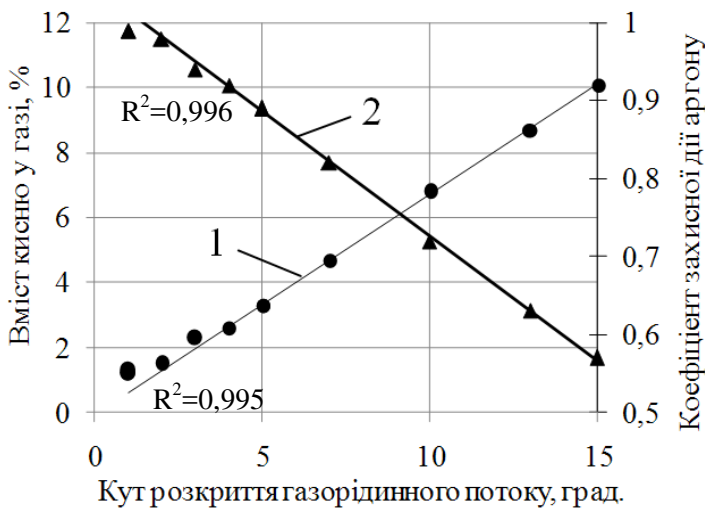


Рис. 5 – Вплив кута розкриття газорідинного потоку на вміст кисню у газовій оболонці навколо потоку (1) і захисну дію аргону (2)

формування газометалевого потоку не відбувається (ступінь організації потоку складає 0,99-1,00);

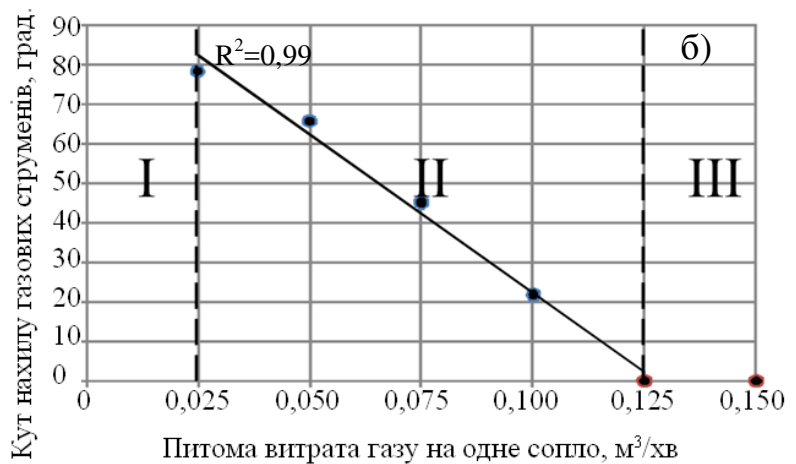
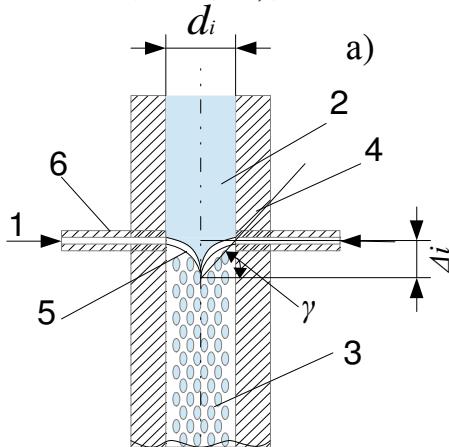


Рис. 6 – Схема утворення газорідинного потоку в процесі продувки (а) і вплив витрати газу на кут нахилу газових струменів (б): 1 – газ; 2 – рідина; 3 – газорідинний потік; 4 – фрагмент сталевипускного каналу; 5 – газова воронка; 6 – продувний вузол; d_i – відстань між продувними вузлами, м; Δi – глибина воронки рідини, м; I, II, III – режими продувки потоку рідини

де: K_{Ar} – коефіцієнт ефективності захисної дії газової оболонки; $\{O_2\}_{Ar}$ – вміст кисню у технічно чистому аргоні, %.

За результатами досліджень на моделі сталевипускного каналу (рис. 2, в) запропоновані схема (рис. 6, а) та класифікація режимів продувки потоку газом розплаву у сталевипускному каналі (рис. 6, б). В залежності від кута нахилу газових струменів (γ) (рис. 6, а), які вдуваються в робочий простір останнього, можна виділити:

– режим «розімкнення» ($\gamma > 78^\circ$), при реалізації якого газові струмені не занурюються в метал і

– режим «змикання» ($0 < \gamma < 78^\circ$), при реалізації якого газові потоки об'єднані, збільшення витрати газу призводить до зменшення кута нахилу газових струменів і 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.

Представлені результати математичного моделювання процесу випуску плавки із використанням методу «діаграм зв'язків» у формі диференціальних рівнянь для системи «ванна конвертера – сталевипускний канал» (6), які реалізовані в оболонці Mathcad:

$$\begin{cases} \frac{dh_1}{dt} = -\frac{Q_4}{S_1} \\ \frac{dQ_4}{dt} = \frac{S_2}{\rho l_1} \cdot \left(\rho g h_1 - \left(\frac{1}{\mu^2} - 1 \right) \cdot \frac{\rho}{2S_2^2} Q_4^2 - \rho g l_1 \cdot \sin \psi \right) \end{cases}, \quad (6)$$

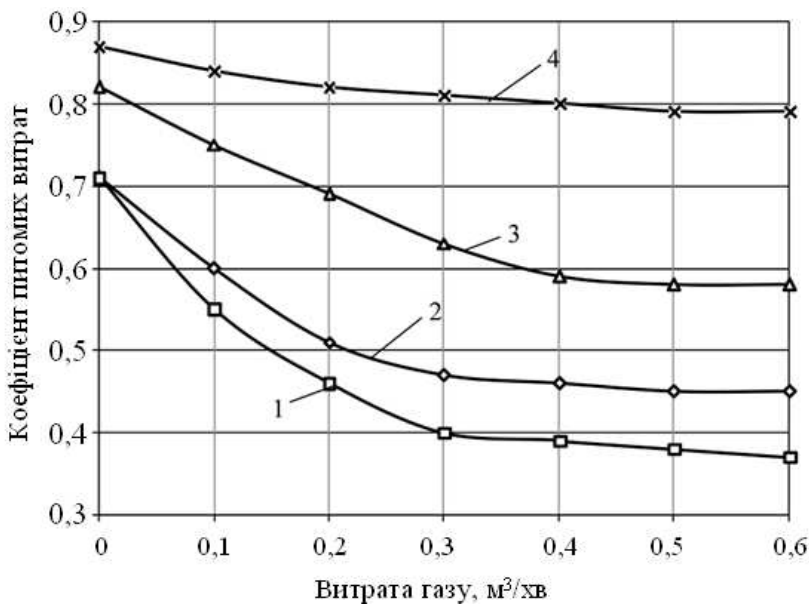


Рис. 7 – Значення коефіцієнту питомих витрат рідини при різній витраті газу для одно- (1, 2) і двокамерного (3, 4) каналу з відносною довжиною реакційної зони 0,75 і 0,25 відповідно

конструкцій сталевипускних каналів при різних витратах газу (рис. 7).

Виявлено, що збільшення витрати газу призводить до зменшення коефіцієнту питомих витрат рідини. Встановлено, що коефіцієнт питомих витрат рідини для двокамерного сталевипускного каналу знаходиться в межах від 0,82-0,87 до 0,58-0,79, для однокамерного – від 0,71 до 0,38-0,45 і має тенденцію до зменшення при збільшенні витрати газу.

У четвертому розділі приведені результати високотемпературних

де h_1 – рівень рідини в конвертері, м; Q_4 – об'ємні витрати рідини крізь сталевипускний канал, м³/с; S_1 – площа перетину рідини в конвертері в положенні випуску, м²; S_2 – діаметр сталевипускного каналу, м²; ρ – густина рідини, кг/м³; g – прискорення вільного падіння, м/с²; l_1 – довжина сталевипускного каналу, м; μ – коефіцієнт питомих витрат рідини; ψ – кут нахилу сталевипускного каналу, рад.

Із використанням математичної моделі розраховані значення коефіцієнтів питомих витрат рідини для дослідних

досліджень закономірностей розкислення залізовуглецевого розплаву залишковим вуглецем у сталевипускному каналі при вдуванні аргону у потік.

Дослідження проводили в 2 етапи. На першому етапі забезпечили вдування аргону у високовуглецевий розплав для визначення раціональних режимів продувки з мінімальним кутом розкриття ГМП. Встановлено, що найбільший вплив на процеси, які відбуваються у ГМП, має ступінь його організації (рис. 8). Обробка розплаву аргonom у однокамерному каналі, оснащеному 4-х сопловим блоком ($Q_{g,1} = 0,05 \text{ м}^3/\text{хв.}$ на одне сопло), не дала позитивних результатів внаслідок збільшення α до 10-15°.

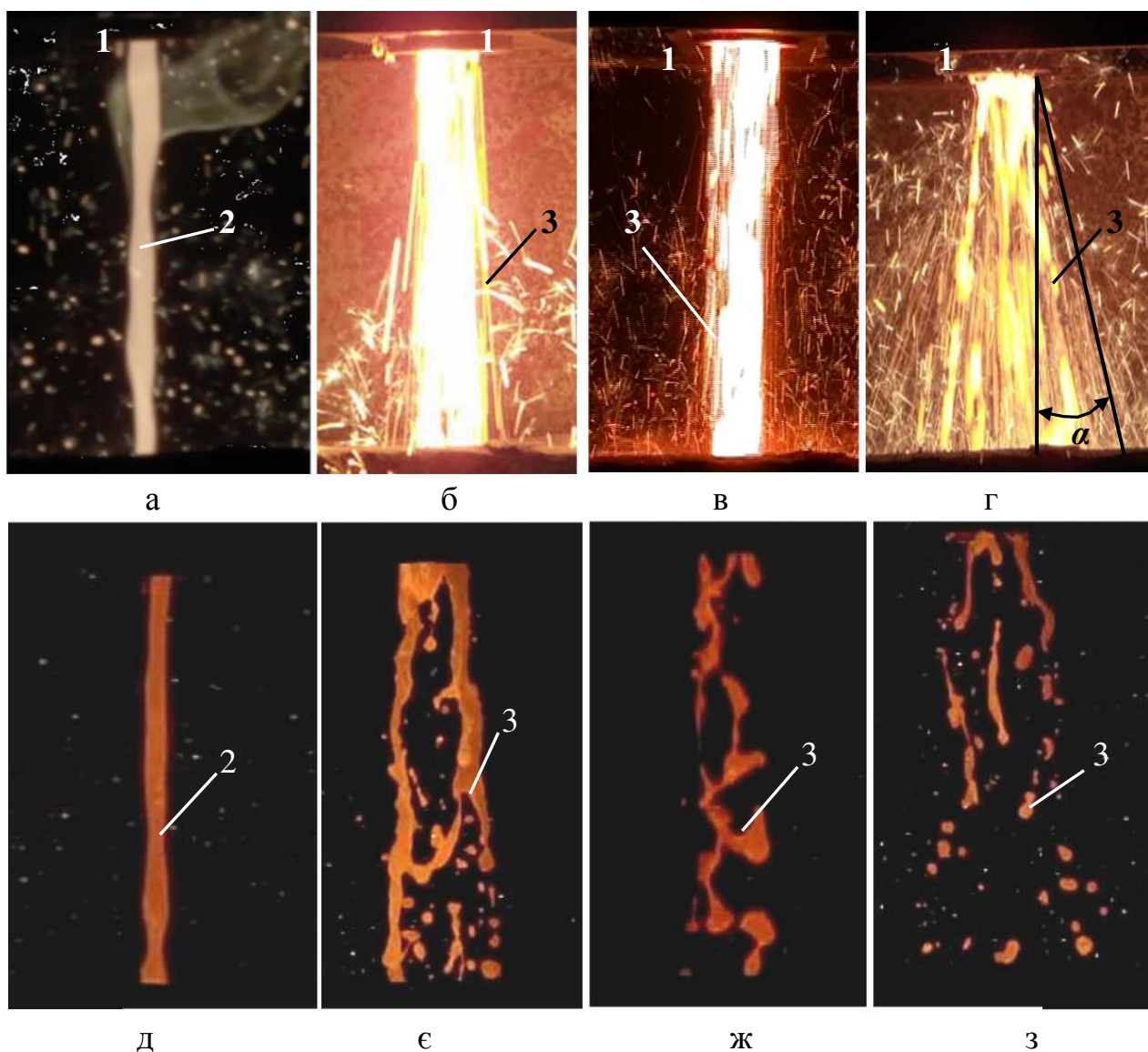


Рис. 8 – Стан та вигляд структури потоку залізовуглецевого розплаву на випуску при звичайній (а, б, в, г) і швидкісній (д, е, ж, з) відеозйомці: а, д – стан потоку без подачі газу; б, е – стан потоку при продуванні через 2 сопла в двокамерному каналі; в, ж – стан потоку при продуванні через 4 сопла в двокамерному каналі; г, з – стан потоку при продуванні через 4 сопла в однокамерному каналі; 1 – зріз каналу; 2 – потік розплаву; 3 – струмені розплаву, утворені за рахунок диспергування металевого потоку аргonom

Чад вуглецю, внаслідок зменшення захисної дії аргону, склав $\Delta C = 0,99\%$.
При використанні двокамерного каналу, оснащеного 2-х сопловим

продувним блоком з $Q_{g.1} = 0,1 \text{ м}^3/\text{хв.}$ і кутом розкриття потоку $\alpha = 5-7^\circ$ зменшення концентрації вуглецю у розплаві склало 0,53%. Найбільш раціональний режим обробки розплаву отримано при $Q_{g.1} = 0,05 \text{ м}^3/\text{хв.}$ (з кутом розкриття $\alpha = 1-3^\circ$) у двокамерному каналі ($\Delta C = 0,04\%$). При випуску розплаву без обробки аргоном чад вуглецю склав $\Delta C = 0,14\%$, що підтверджує актуальність захисту від впливу кисню атмосфери металевого потоку шляхом підвищення ступеню організації та формування захисної газової оболонки.

Таблиця 1 – Зміна хімічного складу та організація газометалевого потоку при вдуванні аргону у високовуглецевий розплав

№	Хімічний склад*, %					Кут розкриття потоку α , град.	Питома витрата аргону на 1 одне сопло, $\text{м}^3/\text{хв.}$
	C	Mn	Si	S	P		
1	<u>4,06</u>	<u>0,175</u>	<u>0,570</u>	<u>0,036</u>	<u>0,044</u>	0	0
	3,92	0,136	0,491	0,035	0,041		
2	<u>4,48</u>	<u><0,10</u>	<u>0,650</u>	<u>0,030</u>	<u>0,044</u>	5-7	0,1
	3,95	<0,10	0,637	0,030	0,044		
3	<u>3,86</u>	<u><0,10</u>	<u>0,560</u>	<u>0,030</u>	<u>0,043</u>	1-3	0,05
	3,82	0,02	0,549	0,034	0,048		
4	<u>3,48</u>	<u><0,10</u>	<u>0,208</u>	<u>0,037</u>	<u>0,043</u>	10-15	0,05
	2,49	<0,10	0,183	0,026	0,037		

* вміст хім. елементу до і після обробки розплаву аргоном в чисельнику і знаменнику відповідно (тут і в табл. 2)

На другому етапі дослідження проводили обробку аргоном нерозкисненого низьковуглецевого розплаву з вмістом $\text{Mn} < 0,05\%$ та слідами Si (табл. 2). Використовували двокамерний сталевипускний канал, обладнаний 4-х сопловим продувним блоком (рис. 3, б).

Після обробки розплаву аргоном ($Q_{g.1} = 0,05 \text{ м}^3/\text{хв.}$) зменшення концентрації вуглецю склало 0,014-0,023% (табл. 2). Вміст алюмінію після розкислення (в пробах з обробкою розплаву аргоном у всіх експериментах) був

Таблиця 2 – Хімічний склад проб низьковуглецевого розплаву до обробки і після обробки аргоном ($1 \text{ м}^3/\text{т}$ розплаву)

№	Хімічний склад, %			
	C	S	P	Al
5	<u>0,046</u>	<u>0,018</u>	<u>0,040</u>	<u>0,050</u>
	0,027	0,017	0,040	0,080
6	<u>0,037</u>	<u>0,016</u>	<u>0,030</u>	<u>0,050</u>
	0,025	0,016	0,030	0,070
7	<u>0,050</u>	<u>0,019</u>	<u>0,030</u>	<u>0,080</u>
	0,036	0,019	0,030	0,100
8	<u>0,040</u>	<u>0,019</u>	<u>0,030</u>	<u>0,055</u>
	0,031	0,019	0,030	0,070

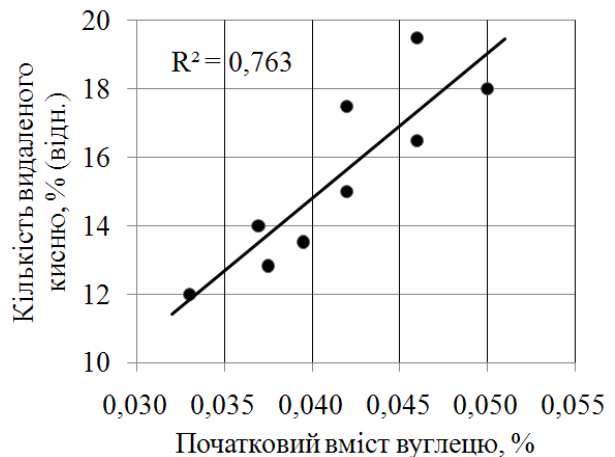


Рис. 9 – Залежність кількості видаленого кисню від початкового вмісту вуглецю у розплаві

підвищений у середньому на 0,02%, що свідчить про зменшення чаду алюмінію та реалізації вуглецевого розкислення.

Підтверджено, що при збільшенні початкового вмісту вуглецю у розплаві частка видаленого кисню збільшується (рис. 9). Так, при обробці розплаву з початковим вмістом вуглецю $[C] = 0,033-0,050\%$ частка видаленого кисню становила 12-19% (відн.), а зменшення чаду алюмінію – 14-20% відповідно.

Запропонована удосконалена фізико-хімічна схема розкислення металевого розплаву залишковим вуглецем (рис. 10).

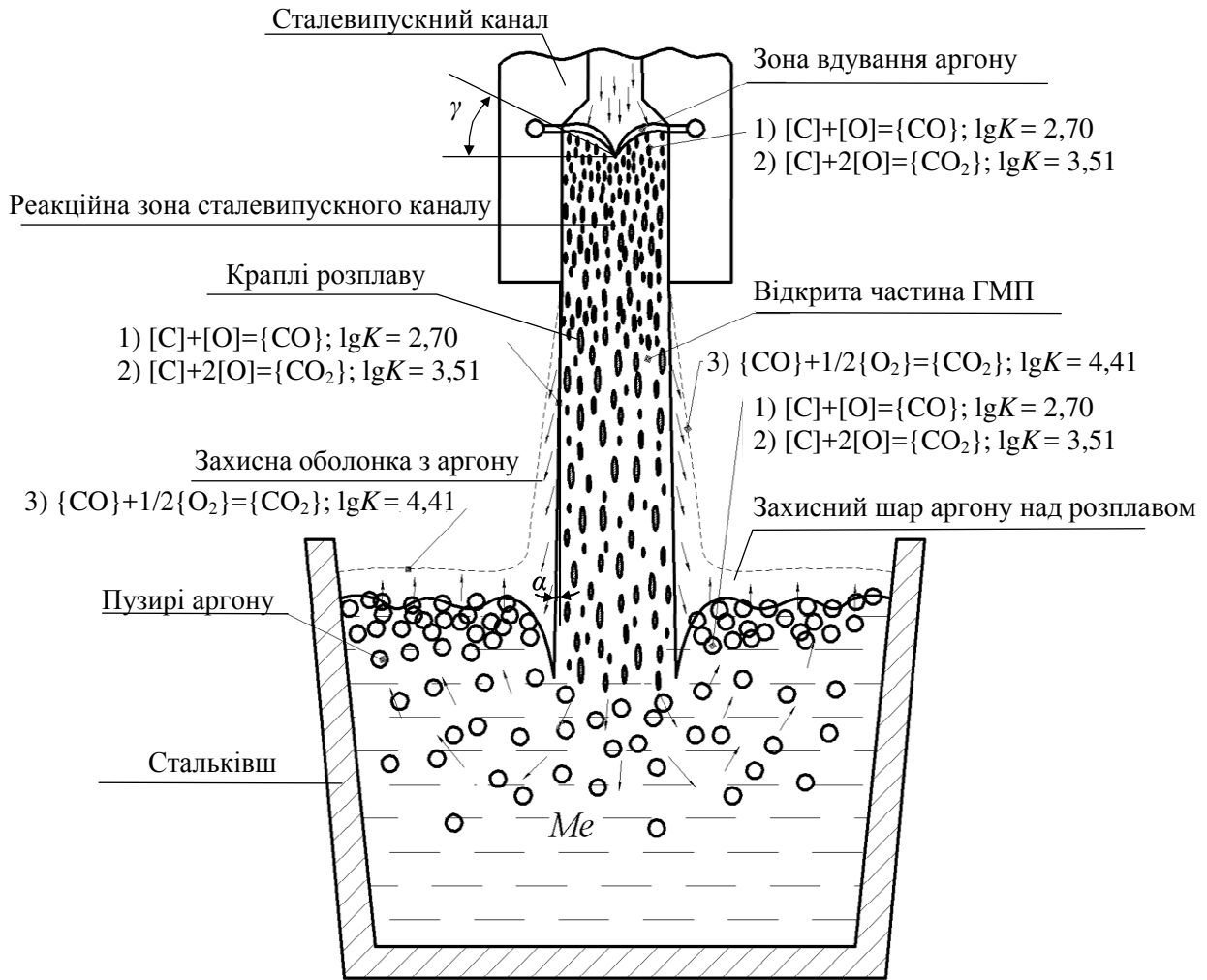


Рис. 10 – Фізико-хімічна схема розкислення залізовуглецевого розплаву аргонem в робочому просторі сталевипускного каналу кисневого конвертера

Відповідно до фізико-хімічної схеми (рис. 10) при вдуванні у потік розплаву аргону в робочому просторі сталевипускного каналу протікають переважно реакції (1), (2) з утворенням CO і CO₂, які переходять до газової фази навколо крапель розплаву.

При виході ГМП за межі сталевипускного каналу відбувається поступове витискання аргону на периферію, що сприяє формуванню захисної газової оболонки уздовж потоку за умови високого ступеня організації останнього ($\alpha=1-3^\circ$). При цьому не виключається ймовірність часткового допалювання CO до CO₂ на границі захисної газової оболонки з навколишньою атмосферою по реакції (3), що може сприяти зменшенню тепловтрат. На

поверхні крапель розплаву в атмосфері аргону створюються умови для протікання реакцій (1), (2).

При потраплянні ГМП у стальківші до моменту спливання пузирів аргону на поверхню розплаву також існують умови для розвитку реакції (1) та (2).

Таким чином, процеси видалення кисню з розплаву відбуваються у робочому просторі каналу, у відкритій частині ГМП і у стальковші. Реалізація механізму розкислення сталі ґрунтується на утворенні розвиненої міжфазної поверхні ГМП, забезпеченні зниження парціального тиску окису вуглецю та термодинамічних умов самовільного протікання реакцій (1) та (2) при вдуванні аргону в потік у робочому просторі сталевипускного каналу.

Кількість продуктів розкислення, які утворюються при вдуванні аргону, можна розрахувати за наступним виразом:

$$M_{CO} = \frac{5,25V_{Me}}{R_1} \int_0^{\tau} \beta_O ([O] - [O]_p) d\tau, \quad (7)$$

де: M_{CO} – маса окису вуглецю, кг; V_{Me} – об'єм розплаву, що піддається обробці за одиницю часу, м³; R_1 – радіус краплі розплаву, м; $[O]$, $[O]_p$ – концентрації кисню в розплаві (фактична і рівноважна відповідно), кг/м³; β_O – коефіцієнт масопереносу кисню, м/с; τ – тривалість обробки краплі розплаву аргоном, с.

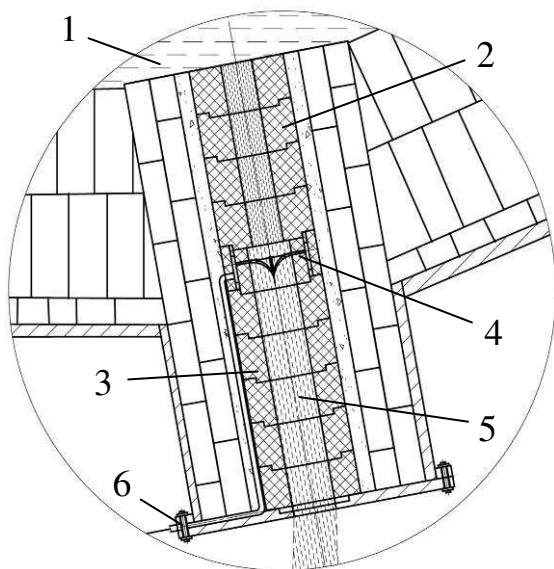


Рис. 11 – Схема двокамерного сталевипускного каналу з продувним блоком: 1 – металевий розплав; 2, 3 – перша і друга камера сталевипускного каналу відповідно; 4 – блок з продувними вузлами (соплами); 5 – ГМП; 6 – насадка з газопідвідною лінією

зменшення площі його поверхні, що призводить до воронкоутворення і затягування шлаку у сталевипускний канал.

Визначено, що при застосуванні штатної технології випуску сталі з конвертера в умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» («ДМК») чад елементів-розкислювачів, наприклад Al, Mn, Si, коливається в межах 35...90%, 14...48% і 14...65% відповідно.

У п'ятому розділі представлені результати промислових досліджень, технологія та конструкція сталевипускного каналу (рис. 11) для реалізації розкислення залишковим вуглецем розплаву.

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

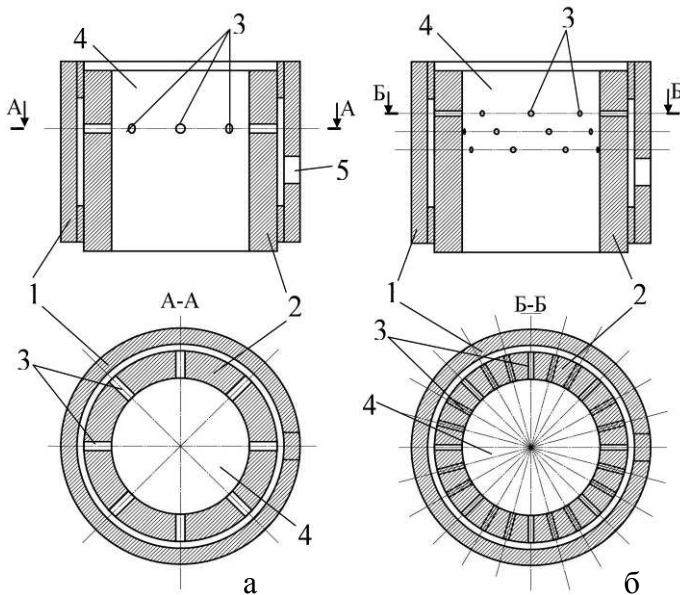


Рис. 12 – Варіанти виконання блоків сталевипускного каналу для обробки розплаву газом: 1 – зовнішня частина блоку; 2 – продувний блок на 8 (а) і 24 (б) сопла; 3 – циліндричні сопла діаметром 10 мм (а) і 5 мм (б); 4 – робочий простір

конвертера по футерівці при наявності потужного гідравлічного напору для забезпечення високого ступеня організації ГМП ($\alpha = 1-3^\circ$). Для використання у другій половині кампанії, при зменшенні довжини каналу з 2000 мм до 1200 мм, може бути використана конструкція 8-ми соплового блоку (рис. 12, а). Це дозволить формувати ГМП з $\alpha = 1-3^\circ$ при зменшенні гідравлічного напору розплаву по ходу випуску.

Доведено, що для зменшення концентрації кисню в розплаві необхідно формувати ГМП 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 упродовж усього випуску плавки (рис. 13). Для умов 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 аргonom складає 10-30% (рис. 14). При концентрації вуглецю перед випуском менше 0,040% зменшення окисленості – 4-10%. Таким чином, для ефективного вуглецевого

Рациональним співвідношенням діаметрів камер модернізованого сталевипускного каналу, для умов ПАТ «ДМК», визнано 1,2-1,5 при відносній довжині реакційної зони (другої камери) – 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 з діаметром відповідно 5 і 10 мм для витрати аргону 0,26-0,43 м³/хв. на одне сопло. Конструкція блоку на 24 сопла (рис. 12, б) призначена для першого періоду кампанії

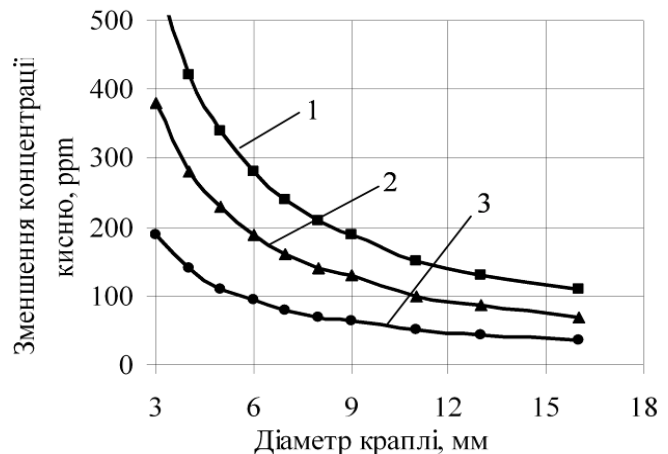


Рис. 13 – Вплив розміру крапель на зменшення концентрації кисню в розплаві: 1, 2, 3 – обробка краплі розплаву аргonom протягом 0,5, 1 і 1,5 с відповідно

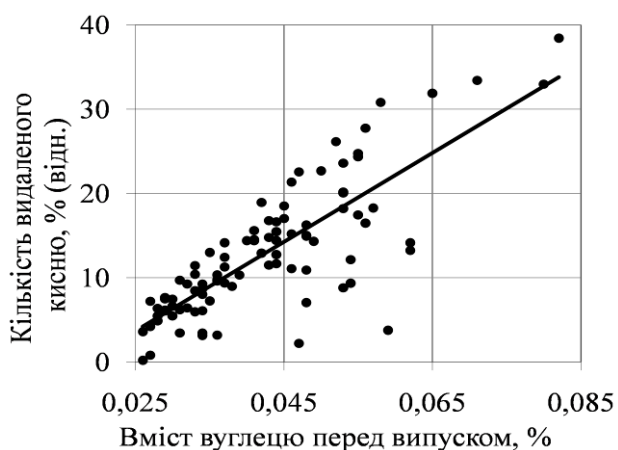


Рис. 14 – Вплив вмісту вуглецю перед випуском на відносну зміну окисленості розплаву

розкислення концентрація залишкового вуглецю у розплаві повинна бути не нижче 0,040%.

Очікуваний економічний ефект від застосування запропонованої технології розкислення розплаву залишковим вуглецем для умов конвертерного цеху ПАТ «ДМК», за рахунок зменшення витрати FeSi на 6,3%, коксового дріб'язку на 5,5%, FeSiMn на 2,2%, Al-AB-87 на 5,5% на розкислення у сталковші, в залежності від початкового вмісту вуглецю, складає 4311789 грн. на рік (2 грн./т сталі).

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-практичне завдання щодо зменшення забрудненості сталі неметалевими включеннями ендogenous походження і витрат розкислювачів за рахунок реалізації розкислення потоку розплаву залишковим вуглецем при продуванні аргоном у робочому просторі сталевипускного каналу. На основі теоретичних досліджень та експериментальних даних про закономірності взаємодії потоку розплаву з аргоном отримали подальший розвиток наукові уявлення та фізико-хімічна схема вуглецевого розкислення сталі. Реалізація механізму вуглецевого розкислення ґрунтується на утворенні розвиненої міжфазної поверхні у газометалевому потоці, зменшенні парціального тиску окису вуглецю та забезпеченні термодинамічних умов самовільного протікання реакції зневуглецювання при вдуванні аргону в потік розплаву.

Найбільш важливі висновки та рекомендації дисертаційної роботи:

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 і 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.

4.3 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 стальковші – 14-20% відповідно.

5. Для дослідження взаємного впливу тривалості випуску, ступеня організації газорідного потоку і захисного ефекту продувного газу розроблена авторська методика та установка низькотемпературного моделювання процесу випуску рідини з моделі конвертера з формуванням газорідного потоку у робочому просторі сталевипускного каналу.

6. Для визначення гідрогазодинамічних закономірностей газометалевого потоку і особливостей розкислення залишковим вуглецем розплаву при вдуванні аргону у робочий простір сталевипускного каналу розроблена авторська методика високотемпературного моделювання процесу випуску розплаву з конвертера.

7. Розроблена математична модель з використанням методу «діаграм зв'язків» придатна для визначення технологічних режимів обробки розплаву аргоном і розрахунку конструктивних елементів сталевипускного каналу. За результатами чисельного моделювання встановлено, що коефіцієнт питомих витрат розплаву для запропонованої конструкції двокамерного сталевипускного каналу знаходиться в межах від 0,82-0,87 до 0,58-0,79, для однокамерного – від 0,7 до 0,38-0,45 і має тенденцію до зменшення при збільшенні витрати аргону.

8. 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% металевого розплаву на останніх 10-20% виникає різке зменшення площі його поверхні, що призводить до воронкоутворення і затягування шлаку у сталевипускний канал.

9. Запропонована конструкція двокамерного сталевипускного каналу кисневого конвертера для реалізації обробки потоку розплаву аргонном на випуску. Раціональним співвідношенням діаметрів камер каналу є 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 м³/(т·год).

10. Очікуваний економічний ефект при реалізації запропонованої технології для умов конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» складає 4311789 грн. на рік (2 грн./т сталі).

11. Розроблені в дисертаційній роботі методики використовуються на кафедрі металургії чорних металів Дніпровського державного технічного університету в навчальному процесі при читанні дисциплін «Металургія чорних металів», «Технології ресурсозбереження в металургії», а також при виконанні студентами випускних дипломних і магістерських робіт.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ ВІДОБРАЖЕНО У НАСТУПНИХ ПУБЛІКАЦІЯХ:

Статті, що включені до міжнародних науково метричних баз:

1. Кулик А.Д. Совершенствование выпуска стали из конвертера / А.Д. Кулик, М.А. Кашеев, **А.А. Похвалитый** // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2013. – №1. – С. 18-20. Цитується в базі Scopus.

Статті у наукових фахових виданнях:

2. Кулик А.Д. О назревшей необходимости расширения рафинировочного потенциала конвертерной технологии (рабочие гипотезы в порядке обсуждения) / А.Д. Кулик, М.А. Кашеев, **А.А. Похвалитый** // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Серія: технічні науки. – Дніпродзержинськ, 2011. – №2(17). – С. 25-30.

3. Повышение эффективности технологии выпуска металла из конвертера. Модель взаимодействия струи с газом в полости летки (сообщение 1) / А.П. Огурцов, А.Д. Кулик, М.А. Кашеев, **А.А. Похвалитый**, С.С. Сотниченко // Збірник наукових праць Дніпродзержинського державного технічного університету. Серія: технічні науки. – Дніпродзержинськ, 2013. – № 3(23). – С. 21-26.

4. Метод диаграмм связи при моделировании гидродинамики выпуска металла из конвертера. Особенности построения топологических структур связи и актуальность применения их в металлургии / В.Т. Тучин, А.Д. Кулик, А.П. Огурцов, И.С. Долгополов, М.А. Кашеев, **А.А. Похвалитый** // Математичне моделювання. – 2013. – №2(29). – С. 91-95.

5. Моделирование выпуска расплава из конвертера с применением метода диаграмм связей / **А.А. Похвалитый**, Е.Н. Сигарев, А.Д. Кулик, В.П. Полетаев // Математичне моделювання. – 2016. – №2. – С. 93-96.

6. Математична модель формування газометалевого потоку у сталевипускному каналі конвертера / **А.А. Похвалітий**, Є.М. Сігарьов, К.І. Чубін, В.П. Полетаєв, О.В. Похваліта // Математичне моделювання. – 2018. – №1(38). – С. 100-105.

Статті у періодичних виданнях:

7. High-temperature modeling of hot metal tapping from the converter with argon supply to the tap hole cavity // **А.А. Pohvalatyi**, A.D. Kulik, E.N. Sigarev, K.I. Chubin, M.A. Kascheev, A.N. Stoyanov / Metallurgical and Mining Industry. – 2017. – №5. – P. 46-50.

Патенти на корисні моделі:

8. Патент №85065 (Україна) С21С 7/072. Спосіб позапічної обробки сталі / А.Д. Кулік, **А.А. Похвалітий**. – Номер заявки: u201305555; заявл.: 29.04.2013; опубл.: 11.11.2013. – Бюл. №21.

9. Патент №93239 (Україна) С21С 7/072, С21С 5/46, С21С 5/42. Спосіб позапічної обробки металу // А.П. Огурцов, А.Д. Кулик, М.А. Кащеев, **А.А. Похвалітий**, В.О. Дерипаско. – Номер заявки: u201403532; заявл.: 07.04.2014; опубл.: 25.09.2014. – Бюл. №18.

Матеріали наукових конференцій:

10. Огурцов А.П. Влияние геометрических параметров конвертера на процесс выпуска плавки / А.П. Огурцов, А.Д. Кулик, **А.А. Похвалитый** // Збірник статей XXV ювілейної Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал світової науки – XXI сторіччя» 3-7 березня 2014 р., м.Запоріжжя. – Запоріжжя, 2014. – С. 85-89.

11. Предварительное углеродное раскисление стали / **А.А. Похвалитый**, А.Д. Кулик, В.П. Полетаев, М.А. Кащеев // Збірник статей XXXV Міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційний потенціал світової науки – XXI сторіччя» 24-27 листопада 2015 р., м.Запоріжжя. – Запоріжжя, 2015. – С. 44-45.

12. Обработка инертным газом стали в летке конвертера / **А.А. Похвалитый**, А.Д. Кулик, В.П. Полетаев, М.А. Кащеев, Д.С. Кочмола // «Литье. Металлургия. 2016»: Материалы XII Международной научно-практической конференции 24-26 мая 2016 г., г.Запорожье; [под. общ. ред. д.т.н., проф. Пономаренко И.О.]. – Запорожье: ЗТПП, 2016. – С. 404-406.

13. Механизм обработки инертным газом металлического потока при выпуске плавки из конвертера / **А.А. Похвалитый**, А.Д. Кулик, Е.Н. Сигарев, В.П. Полетаев, М.А. Кащеев // Международный научный журнал Аста Universitatis Pontica Euxinus. Специальный выпуск: Материалы XII Международной конференции «Стратегия качества в промышленности и образовании» 30 мая – 2 июня 2016 г., г. Варна, Болгария. – Днепропетровск-Варна, 2016. – С. 232-237.

14. **Похвалитый А.А.** Выпуск плавки из конвертера с обработкой металла аргоном в летке / **А.А. Похвалитый** // Тези доповідей Молодіжної науково-технічної конференції «Молода академія 2016» 1 червня 2016 р., м.Дніпропетровськ. – Дніпропетровськ, 2016. – С. 17-18.

15. Похвалітий А.А. Моделирование выпуска расплава из конвертера с применением метода диаграмм связей // **А.А. Похвалітий, Є.М. Сігарьов, В.П. Полетаєв** // VIII Молодіжна Міжнародна конференція молодих вчених «Молоді вчені 2017 – від теорії до практики» 17 лютого 2017 р., м.Дніпро. – Дніпро, 2017. – С. 111-114.

16. Розкислення сталі залишковим вуглецем // **А.А. Похвалітий, Є.М. Сігарьов, А.Д. Кулик, В.П. Полетаєв, М.А. Кащєєв** / «Металлургия. 2017»: Материалы VI Международной научно-практической конференции 23-25 мая 2017 г., г.Запорожье; [под. общ. ред. д.т.н., проф. Пономаренко И.О.]. – Запорожье: АА Тандем. – 2017. – С. 189-191.

АНОТАЦІЯ

Похвалітий А.А. Удосконалення випуску сталі з конвертера з одночасним розкисненням шляхом використання вуглецевого потенціалу розплаву. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». – Дніпровський державний технічний університет. – м.Кам'янське-2018.

Дисертацію присвячено удосконаленню технології випуску сталі з конвертера з одночасним розкисненням шляхом використання вуглецевого потенціалу розплаву, що забезпечує підвищення ресурсозберігаючої ефективності за рахунок зменшення питомої витрати розкислювачів.

За результатами фізичного моделювання уперше визначено вплив конструкції удосконаленого сталевипускного каналу, оснащеного продувним блоком, на тривалість випуску, ступінь організації і умов захисту газометалевого потоку від впливу атмосферного кисню. Уперше доведено, що при обробці розплаву газом в робочому просторі сталевипускного каналу в дослідженому діапазоні існує «поріг» – критична витрата газу, перевищення якої призводить до зміни ступеня організації газометалевого потоку і тривалості випуску сталі. Встановлено, що при витраті газу нижче критичної для одно- і двокамерного 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 і становить 0,72-0,83 і 0,83-0,88 відповідно для одно- і двокамерного сталевипускного каналу.

Уперше запропоновано класифікацію режимів продувки потоку рідини у сталевипускному каналі, відповідно до якої обробку розплаву рекомендується проводити в режимі «змикання» газових струменів (кут нахилу газових струменів (γ) в робочому просторі сталевипускного каналу знаходиться в межах від 78° до 0°). Даний режим характеризується створенням умов для формування газометалевого потоку з розвиненою міжфазною поверхнею і високим ступенем організації (кут розкриття газометалевого потоку $1-3^\circ$).

З використанням результатів високотемпературного моделювання і термодинамічного аналізу отримали розвиток наукові уявлення щодо фізико-

хімічної схеми вуглецевого розкислення сталі, згідно з якою процеси видалення кисню при вдуванні аргону у сталевипускний канал відбуваються не тільки у робочому просторі каналу, а і у відкритій частині газометалевого потоку, і у стальковші. Реалізація механізму розкислення сталі ґрунтується на утворенні розвиненої міжфазної поверхні газометалевого потоку, забезпеченні зменшення парціального тиску окису вуглецю та термодинамічних умов самовільного протікання реакції розкислення при вдуванні аргону в потік у робочому просторі сталевипускного каналу.

За результатами чисельного моделювання встановлено, що коефіцієнт питомих витрат розплаву для запропонованої конструкції двокамерного сталевипускного каналу знаходиться в межах від 0,82-0,87 до 0,58-0,79, для однокамерного – від 0,7 до 0,38-0,45 і має тенденцію до зменшення при збільшенні витрати аргону.

Запропоновано конструкцію двокамерного сталевипускного каналу кисневого конвертера для реалізації обробки розплаву аргонем на випуску. Раціональним співвідношенням діаметрів камер каналу є 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 м³/(т·год).

Очікуваний економічний ефект при реалізації запропонованої технології для умов конвертерного цеху ПАТ «Дніпровський меткомбінат» складає 4311789 грн. на рік.

Ключові слова: сталевипускний канал, конвертер, моделювання, окисленість, вуглецеве розкислення, аргон, газометалевий потік, захист розплаву.

SUMMARY

Pohvality A.A. Improvement of the tapping steel from a converter with simultaneous deoxidation by using the carbon potential of the melt. – Manuscript of qualification research.

Thesis for Candidate of Engineering Sciences specializing (05.16.02) – "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys". – Dniprovsky State Technical University. – Kamianske-2018.

The thesis is devoted to the improvement of technology for the production of steel from a converter with simultaneous deoxidation by using the carbon potential of the melt, which provides increased resource saving efficiency by reducing the specific consumption of deoxidizers.

According to the results of physical modeling, for the first time, the influence of the design of an improved steel-tapping channel equipped with a blow-off block, on the duration of tapping, on the degree of organization and on the protection of gas-metal flow from atmospheric oxygen has been determined for the first time. It has been proved for the first time that when treating the melt with gas in the working space of the steel-tapping channel in the investigated range, there is a "threshold" - a critical gas flow, the excess of which leads to a change in the degree of organization of gas-metal flow and the duration of steel production. It was established that when the gas flow is lower than the critical one- and two-chamber steel outlet, the duration of the melt tapping varies in 1.3-3.0 and 0.9-1.4 times respectively, and the degree of

organization of the flow is 0.94-0.99. When the critical gas flow rate is exceeded, the effect on the subsequent increase in the duration of tapping is insignificant, the degree of organization of the flow decreases and is 0.72-0.83 and 0.83-0.88 respectively for one and two-chamber steel-tapping channel.

For the first time, the classification of the purges of the flow of liquid in the steel-tapping channel was proposed, according to which it is recommended to process the melt in the mode of "closing" the gas jets. This mode is characterized by the creation of conditions for the formation of a gas-metal flow with a developed interfacial surface and a high degree of organization.

Using the results of high-temperature simulation and thermodynamic analysis, the development of scientific ideas about the physicochemical scheme of carbon deoxidation of steel was obtained, according to which the processes of oxygen removal during the injecting of argon into the steel-tapping channel occur not only in the working space of the channel, but also in the open part of the gas-metal flow, and in steel ladle. The implementation of the mechanism of deoxidation of steel is based on the formation of a developed interphase surface of the gas-metal flow, providing for the reduction of the partial pressure of carbon monoxide and the thermodynamic conditions of the unwanted flow of the deoxidation reaction when the argon is injected into the flow in the working space of the steel-tapping channel.

According to the results of numerical simulation, it was found that the coefficient of specific flow rates of a melt for the proposed design of a two-chamber steel-tapping channel is in the range from 0.82-0.87 to 0.58-0.79, for one-chamber from 0.7 to 0.38-0.45 and tends to decrease with increasing costs of argon.

The construction of a two-chamber steel-tapping channel of an oxygen converter for the realization of argon melt processing on the tapping is proposed. The rational ratio of the diameters of the chambers of the channel is 1.2-1.5, and the relative length of the reaction zone (second chamber) – 0.25-0.75 of the full length of the channel at an argon flow of 0.7-2.8 m³/(t*h).

Expected economical effect in implementing the proposed technology for the conditions of the converter shop of PJSC «Dniprovsky Integrated Iron&Steel Works» is 4311789 UAH in year.

Keywords: steel-tapping channel, converter, modeling, oxidation, carbon deoxidation, argon, gas-metal flow, protection of melt.

ПОХВАЛІТИЙ АРТЕМ АНАТОЛІЙОВИЧ

**УДОСКОНАЛЕННЯ ВИПУСКУ СТАЛІ З КОНВЕРТЕРА З
ОДНОЧАСНИМ РОЗКИСЛЕННЯМ ШЛЯХОМ ВИКОРИСТАННЯ
ВУГЛЕЦЕВОГО ПОТЕНЦІАЛУ РОЗПЛАВУ**

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підписано до друку 13.09.2018 р. Формат 60×84/16.
Папір офсет. Різографія. Ум. друк. арк. 1,2.
Тираж 100 прим. Зам. № 47/18.

Дніпровський державний технічний університет
51918, м. Кам`янське, вул. Дніпробудівська, 2.
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до державного реєстру видавництва серія ДК №5399
від 26.07.2017 р.

