

**ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

**ПІСМАРЬОВ КОСТЯНТИН ЄВГЕНОВИЧ**

УДК 669.184

**РОЗВИТОК ТЕОРІЇ ПРОДУВАННЯ МЕТАЛУ АРГОНОМ  
І ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОЗАПІЧНОЇ ОБРОБКИ ТА  
РОЗЛИВАННЯ НАДНИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ**

**Спеціальність 05.16.02** – металургія чорних і кольорових металів  
та спеціальних сплавів

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Донецьк – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор  
СМІРНОВ Олексій Миколайович,  
Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»,  
(м. Донецьк), завідувач кафедри «Металургія сталі».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
МАКУРОВ Сергій Леонідович,  
Приазовський державний технічний університет  
(м. Маріуполь), професор кафедри «Теорія  
металургійних процесів»;

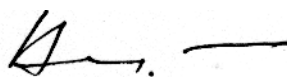
кандидат технічних наук  
ЄФІМОВА Вероніка Гаріївна,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»  
(м. Київ), доцент кафедри «Фізична хімія».

Захист відбудеться «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.01 Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресу: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, I навч. корпус, малий актовий зал.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83001, м. Донецьк, вул. Артема, 58, II навч. корпус.

Автореферат розісланий «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
Д 11.052.01, д.т.н., проф.



О.В. Яковченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Сучасні тенденції розвитку світової чорної металургії характеризуються прагненням виробників металопродукції поліпшити якість сталі вже на стадії її виплавки й розливання. Суттєві успіхи в цьому напрямку дозволили ствердитися на світовому ринку металопродукції зовсім новим групам сталі, що мають, як правило, високі експлуатаційні й технологічні кондиції й високу додану вартість. До числа таких груп сталей відносяться сталі з наднизьким вмістом вуглецю, які широко використовуються в сучасному автомобілебудуванні.

Як показує практика, виробництво нових груп сталі вимагає певних корекцій технологічного процесу й модернізації устаткування. В цьому плані перевага надається технічним рішенням, які не вимагають значних інвестицій. Відповідно базою для створення технологій виплавки й розливання нових марок сталі можуть стати, насамперед, сучасні сталеплавильні комплекси, до числа яких відноситься й конвертерний цех ВАТ «Алчевський металургійний комбінат» (ВАТ «АМК»).

Дисертаційна робота присвячена розвитку сучасних уявлень про можливість рафінування й запобігання забруднення неметалевими вкрапленнями сталей з наднизьким вмістом вуглецю. На момент початку проведення досліджень в Україні були відсутні будь-які значні розробки й технологічні регламенти для виробництва й розливання сталей такого класу.

Рішення важливого науково-технічного завдання щодо розвитку теорії продування металу аргоном і вдосконалення технології позапічної обробки й розливання наднизьковуглецевих сталей дозволить розробити ефективну технологію виробництва й розливання сталей з наднизьким вмістом вуглецю. Виконані в дисертації дослідження спрямовані на рішення поставленого завдання, що свідчить про актуальність теми.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Матеріали дисертаційної роботи являють собою узагальнення наукових і практичних результатів, отриманих автором у період з 2003 р. по 2010 р. при розробці технічних завдань по модернізації сталеплавильного комплексу ВАТ «АМК», відпрацюванні технологічних регламентів окремих етапів виплавки, позапічної обробки й розливання сталі, а також при виконанні науково-дослідних і держбюджетних робіт, проведених разом із ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» і Донбаським державним технічним університетом, в яких автор був керівником і виконавцем від комбінату: «Оптимізація параметрів продувки металу аргоном при обробці на обладнанні «ківш-піч» для підвищення ефективності рафінування та зниження зносу футеровки ковшів» (г/т 07-145 між ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» і ВАТ «АМК», 2007 р.); «Дослідження і розробка технологічних варіантів позапічної обробки і розливання на МБЛЗ наднизьковуглецевих марок сталей (IF) з метою забезпечення їх необхідної чистоти» (г/т 067/2660 між Донбаським державним технічним університетом і ВАТ «АМК», 2007 р.); «Оптимізація технологічних параметрів виробництва IF-сталі на етапі конвертер-сталерозливний ківш-кристалізатор

МБЛЗ для забезпечення стабілізації концентрації шкідливих вкраплень у безперервнолитому слябі» (г/т 067/948 між Донбаським державним технічним університетом і ВАТ «АМК», 2008-2009 г.); «Розвиток теоретичних основ безперервного розливання нержавіючих та автолистових сталей (номер державної реєстрації ДР 0110U000094).

**Мета й завдання дослідження.** Метою роботи є розвиток теорії продування металу аргоном і вдосконалення технології позапічної обробки й розливання наднизьковуглецевих сталей, спрямовані на отримання металу з низьким вмістом шкідливих домішок і неметалевих вкраплень шляхом запобігання потрапляння їх у метал у сталерозливному і проміжному ковші, а також у ході технологічних переливів.

Для досягнення зазначеної мети в роботі були поставлені наступні основні завдання:

- виконати аналіз тенденцій розвитку і вдосконалення сучасної концепції виплавки, ковшової обробки й розливання сталі з наднизьким вмістом вуглецю в напрямку забезпечення високого рівня чистоти по шкідливих домішках і неметалевих вкрапленнях;

- дослідити вплив кількості пічного шлаку, що потрапляє при випуску в сталерозливний ківш, на процеси вторинного окиснення й зміну хімічного складу сталі в ході ковшової обробки й розливання;

- вивчити гідродинамічну картину поведінки рафінувального шлаку на поверхні дзеркала металу при продуванні розплаву аргоном у сталерозливному ковші залежно від витрати газу, кількості продувних вузлів і їхнього розташування;

- виконати дослідження особливостей поведінки неметалевих вкраплень різних розмірів у сталерозливному і проміжному ковшах при продуванні аргоном, а також в кристалізаторі МБЛЗ;

- за допомогою отриманих уявлень розробити ряд технологічних прийомів і засобів підвищення чистоти безперервнолитого сляба шляхом організації ефективного відсікання пічного шлаку і запобігання його захоплення конвективними потоками в промківші і кристалізаторі;

- застосувати результати наукових досліджень і запропонованих технологічних прийомів для розробки техніки й технології виплавки, позапічної обробки й безперервного розливання сталі з наднизьким вмістом вуглецю з метою забезпечення заданої продуктивності, вимог до хімічного складу й рівня чистоти металу по неметалевих вкрапленнях;

- виконати освоєння технології виробництва й розливання сталей з наднизьким вмістом вуглецю в умовах ВАТ «АМК».

**Об'єкт дослідження.** Процеси рафінування металу при його продуванні аргоном, а також перемішування металу й шлаку у ковші, промківші й кристалізаторі МБЛЗ.

**Предмет дослідження.** Технологія примусового перемішування металу при його позапічній обробці в ковші й при безперервному розливанні, що включають продування сталі аргоном і видалення неметалевих вкраплень.

*Методи дослідження.* У роботі використовували теоретичні й експериментальні методи досліджень, які базуються на основних положеннях теорій металургійних процесів, масообмінних процесів і подібності. Виконано лабораторні дослідження характеру й ефективності примусового перемішування рідини в ковші, промківші й кристалізаторі МБЛЗ на фізичних моделях. Для дослідження процесів руху потоків у ковші й кристалізаторі використовувалося математичне моделювання. При математичному моделюванні процесів руху потоків у ковші й кристалізаторі й статистичній обробці даних використовували ПЕОМ. Виконано промислові дослідження ефективності відсікання шлаків і рафінування сталі в ковші й промислову перевірку результатів теоретичного аналізу, математичного й фізичного моделювання.

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

**1. Отримали подальший розвиток наукові уявлення щодо динаміки продування металу аргоном крізь фурми, розташовані в днищі ковша.** На фізичній моделі показано, що продування аргоном у великовантажних ковшах з відношенням висоти наливу  $H$  до діаметра ковша  $D$  у межах 1,30-1,40 приводить до оголення в середньому на 25-30% більшої площі дзеркала, ніж при відношенні  $H/D \approx 1$  (при витраті газу, що вдувається, у широкому діапазоні значень). Встановлено, що для ковшів з відношенням  $H/D$  рівним 1,30-1,40 у придонній частині формується застійна зона, що займає 0,15-0,25 обсягу рідкої ванни й не втягується в перемішування основним циркуляційним потоком. Розміри цієї зони можуть бути значно (до 50-60%) зменшені за рахунок зміщення продувної пробки до стінки ковша.

**2. У промислових умовах за допомогою розробленого пробовідбірника встановлено, що в умовах продування металу аргоном у ковші має місце захват і залучення вглиб рідкої ванни великих шлакових вкраплень конвективними потоками, що сформувалися.** При цьому такі вкраплення надалі потрапляють у застійну зону в донній частині ковша й слугують джерелом забруднення сталі. Розміри таких шлакових вкраплень не перевищують, як правило, 90-100 мкм, а їх форма близька до кулевидної або овальної.

**3. Вперше виконана промислова оцінка впливу швидкості переливу сталі з ковша в ківш (місткість ковша 300 т) на ефективність відсікання шлаків.** Показано, що залежно від швидкості падіння рівня металу (витрата сталі 15-30 т/хв) і кількості випускних отворів (1 або 2) у нижній сталерозливний ківш потрапляє від 100 до 300 кг пічного шлаку. Встановлено, що процеси вторинного окиснення металу шлаком, що потрапив в сталерозливний ківш, не отримують значного розвитку при його масі до 100-120 кг (0,33-0,40 кг/т сталі).

**4. Отримали подальший розвиток уявлення про ефективність видалення великих неметалевих вкраплень при продуванні сталі аргоном крізь продувні балки, встановлені в днищі промковша МБЛЗ.** Показано, що при обробці металу в 60-т промківші двострумкової слябової МБЛЗ найкращі результати рафінування (ефективність видалення неметалевих вкраплень становить 91-94%) досягаються при витраті аргону на одну балку в кількості 10-12 л/хв. При цьому конвективні потоки металу, що формуються в зоні продування,

повинні надходити переважно у верхню половину рідкої ванни (0,4-0,5 висоти наливу), що забезпечується встановленими порогами.

**5. Отримали подальший розвиток наукові уявлення про поширення потоків металу в кристалізаторі слябової МБЛЗ.** Виявлено стійкі вихрові структури потоків рідкої сталі в кутах широкої грані сляба, що формується, які сприяють утворенню стоячих хвиль на поверхні рідкої ванни і захвату металом шлакових вкраплень. Фізичним і математичним моделюванням встановлено, що для слябових МБЛЗ мінімізації хвильових і вихрових явищ вдається досягти при глибині занурення розливного стакану 200-210 мм і більше. При цьому раціональною областю кута розкриття струменя, що витікає із заглибного стакану, є значення в межах 15-30°.

**Практичне значення отриманих результатів.** Результати проведеного дослідження знайшли практичне застосування:

- в обґрунтуванні, розробці й апробуванні технології комплексної позапічної обробки сталі з наднизьким вмістом вуглецю в сталерозливному і проміжному ковші при продуванні аргоном, що забезпечує задану якість металу по неметалевих вкрапленнях і шкідливих домішках шляхом раціонального сполучення фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних впливів. Зокрема, в умовах конвертерного цеху ВАТ «АМК» впровадження заходів щодо усунення джерел влучення домішок у готову сталь на етапах її виплавки, обробки й розливання забезпечило підвищення конкурентоспроможності продукції комбінату;

- у створенні лабораторних установок для візуального вивчення процесів перемішування моделюючих рідин у ковші, промківші й кристалізаторі слябової МБЛЗ, що дозволило розробити способи підвищення чистоти сталі за рахунок спливання неметалевих вкраплень і запобігання захоплення шлаку у ході технологічних переливів;

- у розробці додаткових критеріїв, які забезпечують ефективне керування процесами позапічної обробки й безперервного розливання сталі стосовно до виробництва сталі з наднизьким вмістом вуглецю, що дозволило розробити теоретичні й практичні рекомендації для вибору параметрів основного устаткування і його вдосконалення, зокрема, конструкційних рішень промковша й заглибного стакану;

Основні наукові й практичні результати використані ВАТ «АМК» при формуванні стратегії розвитку й реалізації програми реконструкції сталеплавильного комплексу. Фактичний річний економічний ефект від впровадження рекомендацій, що базуються на результатах дисертаційних досліджень, склав 9423000 грн. Частка автора становить 10% (942300 грн).

**Особистий внесок здобувача.** Основні ідеї досліджень належать авторові дисертації. Теоретична постановка завдань і проведення експериментальних робіт, виконання розрахунків, фізичне й комп'ютерне моделювання процесів, які вивчаються, аналіз і узагальнення результатів досліджень, на основі яких вдосконалена технологія позапічної обробки й безперервного розливання сталі з наднизьким вмістом вуглецю, виконані автором самостійно. Розроблені і застосовані у виробництві промислові технології. Конкретний особистий внесок

здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві, даний у вигляді коротких анотацій після вказання їх номерів у списку опублікованих робіт з теми дисертації.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові положення й результати дисертації обговорені на: 9-му міжнародному конгресі сталеплавильників (м. Старий Оскол, жовтень, 2006); міжнародній науково-технічній конференції «Современные тенденции разработки и производства сталей и труб для магистральных газонефтепроводов» (м. Москва, 12 – 13 лютого 2008 р.); 10<sup>th</sup> Continuous Casting Conference – CCC' 08 (м. Лінц, Австрія, 26 –27 травня 2008 р.); 6<sup>th</sup> European Conference on Continuous Casting (м. Ріцьоне, Італія, 3-6 червня 2008 р.); Iron & Steel Technology Conference AISTech (м. Сент Луїс, США, 4-7 травня 2009 р.); міжнародній науково-технічній конференції «Современные огнеупорные системы и расходующие материалы в сталеплавильном производстве» (м. Донецьк, 13-14 квітня 2010 г.); XI міжнародному симпозіумі по десульфурзації чавуну й сталі Almamet (м. Берлін, Німеччина, 15-18 вересня 2010 р.); міжнародній науково-технічній конференції «50 лет непрерывной разливке в Украине» (м. Донецьк, 4-5 листопада 2010 р.); науково-практичному семінарі кафедри «Металургія сталі» ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (2010 р.).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 16 наукових працях, у тому числі в 11 статтях наукових журналів, 3 статтях збірників наукових праць, 1 монографії, 1 патенті України на винахід. З них 9 статей опубліковані в спеціалізованих наукових виданнях, включених у перелік ВАК України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 167 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 168 сторінок, загальний обсяг - 137 сторінок. У розділах дисертації є 54 рисунки і 16 таблиць (у тому числі 7 рисунків й 2 таблиці на окремих сторінках).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Перший розділ** «Сучасний розвиток вимог до якості й технології виробництва сталі з наднизьким вмістом вуглецю». Представлений аналіз основних тенденцій у розвитку технологій виробництва, позапічної обробки й розливання сталі. Одним з перспективних конструкційних матеріалів для виробів, що отримуються методом глибокої витяжки, є сталі з наднизьким вмістом вуглецю (0,002-0,020%). Такі сталі містять мінімальну кількість азоту, кремнію і вуглецю, мають жорсткі обмеження щодо вмісту різних домішок і неметалевих включень і є перспективними на світовому ринку металопродукції. Технологія виплавки, позапічної обробки й розливання сталі з наднизьким вмістом вуглецю й шкідливих домішок у різних виробників має істотні, хоча й невеликі, відмінності, які виражаються у розробці власного хімічного складу сталі, технологічного обладнання,

яке застосовується, феросплавів, які використовуються, вогнетривких матеріалів і т.д.

Разом з тим, необхідно враховувати два основних аспекти поведінки хімічних елементів, що входять до складу сталі з наднизьким вмістом вуглецю, на етапі сталерозливний ківш – МБЛЗ: збереження досягнутих наднизьких концентрацій азоту, вуглецю й кремнію; забезпечення чистоти сталі за неметалевими вкрапленнями, зокрема алюмінатами, які легко утворюються в результаті вторинного окиснення, у тому числі за рахунок відновлення менш міцних оксидів шлакової фази. Це створює передумови для застосування наукового підходу до питання створення оригінальної технологічної побудови для виробництва сталі з наднизьким вмістом вуглецю в умовах конвертерного цеху ВАТ «АМК».

У зв'язку з відсутністю в Україні досвіду виплавки і розливання сталі з наднизьким вмістом вуглецю вказані питання в даний час недостатньо вивчені, тому є актуальним дослідження впливу перемішування металу в ході цих процесів на забезпечення потрібного складу сталі.

*Другий розділ «Фізичне моделювання процесів поведінки екзогенних неметалевих вкраплень у рідкій сталі».* Розкрито сутність основних методів досліджень і аналізу отриманих результатів. Описані застосовані методики моделювання поведінки неметалевих вкраплень у ковші, промковші й кристалізаторі слябової МБЛЗ, а також принципи виконання порівняльних кількісних оцінок. Фізичне моделювання виконувалось на прозорих моделях сталерозливного й проміжного ковша, а також кристалізатора МБЛЗ, виконаних з урахуванням критеріїв гідродинамічної, часової та геометричної подібності. В якості робочої рідини, що моделює рідку сталь, використовували воду з температурою 18-25<sup>0</sup>С, а в якості рідкого шлаку – силіконове масло, що має високе значення величини поверхневого натягу.

Геометричні розміри ємності, що імітує сталерозливний ківш, були вибрані наступними: діаметр – 0,24 м, висота – 0,36 м. Перемішування рідини в ковші здійснювалося стисненим повітрям, що подається через один або два продувних вузла в днищі ковша. Встановлено, що існують певні відмінності під час продування металу в ковші зі значенням відношення висоти металу (Н) до діаметру ковша (D) на рівні 1,30-1,40 від ковшів традиційної конструкції ( $H/D \approx 1,0$ ). По мірі збільшення величини відношення  $H/D$  в області днища ковша спостерігається формування добре вираженої «застійної» зони, рідина якої практично не бере участь в основному процесі перемішування. По суті, ця зона може розглядатися як потенціальне джерело неметалевих вкраплень, які потрапляють з сталерозливного ковша в промківш. Крім того, під час продувки в ковшах з  $H/D = 1,30-1,40$  спостерігається збільшення площі оголеної плями («ока») в середньому на 25-30%. Застосування в ковші двох продувних фурм, розташованих на певній відстані одна від одної, призводить до локалізації деякої частини шлаку біля стінки ковша, що може служити причиною підвищеного зносу вогнетривів в зоні шлакового пояса. Разом з тим, наявність двох продувних фурм сприяє збільшенню ймовірності захоплення частинок шлаку металом і переміщення їх вглиб металу в ковші за інтенсивної продувки.



Геометричний масштаб фізичної моделі промковша слябової МБЛЗ ВАТ «АМК» було обрано 1:4, що дозволило візуалізувати всі основні моменти поведінки рідини й неметалевих крапель у процесі розливання. Візуалізацію потоків проводили за рахунок підфарбовування кольоровими чорнилами локальних обсягів води, яка витікає з «сталерозливного ковша». Імітацію неметалевих крапель здійснювали за допомогою порції гідрофобних частинок (завись дрібних твердих частинок в олії), які спеціально вводилися в процесі розливання в захисну трубу. При цьому в ході експериментів виконували оцінку траєкторії руху частинок у рідкій ванні промковша, а також оцінювали частку асимільованих шлаком частинок. Для цього рідину, що витікає із промковша збирали в ємність і відстоювали протягом трьох годин, що забезпечувало спливання на поверхню речовини, яка імітувала неметалеві крапління. Після цього імітатор збирали й зважували.

Встановлено, що для умов слябової МБЛЗ найбільш ефективним методом забезпечення чистоти сталі по неметалевим краплінням є застосування комбінації «фільтраційна перегородка – продувальна балка» в сукупності з металоприймачем типу «турбостоп». За цих умов механізм продувки аргоном спрацьовує достатньо надійно в тому випадку, якщо циркуляційні потоки, що формуються металоприймачем і фільтраційною перегородкою, розташовуються вище 0,4-0,5 висоти наливу рідини в промковші. Показано також, що максимальний ефект відділення й спливання неметалевих крапель забезпечується в тому випадку, коли витрати газу виявляються такими, за яких поверхня води в промковші не оголяється від розташованого на ній масла. Отримані в результаті фізичного моделювання дані узагальнені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Оцінка ефективності видалення неметалевих крапель з рідини в промковші за різних варіантів руху циркуляційних потоків**

№ п/п	Елементи управління, встановлені в промковші				Ефективність видалення крапель, %	
	Метало-приймач	Фільтраційні перегородки				Продувальна балка
		повнопро-фільні	на 1/2 висоти	на 1/3 висоти		
1	—	—	—	—	60-65	
2	—	●	—	—	80-82	
3	—	—	—	●	75-77	
4	●	—	—	—	80-82	
5	●	●	—	—	86-88	
6	●	—	—	●	84-87	
7	●	—	—	—	●	70-80
8	●	●	—	—	●	92-94
9	●	—	●	—	●	91-94
10	●	—	—	●	●	91-94

Модель кристалізатора була виконана в масштабі 1:2 до натурального об'єкту. Для візуалізації руху усталених циркуляційних потоків у рідкій ванні кристалізатора у внутрішню порожнину заглибного стакану вводили порцію підфарбованої чорнилом води.

На підставі виконаних оцінок характеру руху рідини гідродинамічні потоки, які виникають у верхній частині кристалізатора були умовно класифіковані на 5 підобластей з однаковими умовами напрямку векторів швидкостей, величини швидкості та інтенсивності турбулентності: область виходу струменя з розливного стакану; область контакту струменя зі стінкою кристалізатора; область під поверхнею рідкої ванни; область верхньої та нижньої рециркуляції.

Кількісну оцінку поділу струменя рідини, яка витікає з заглибного стакану, на два потоки здійснювали за допомогою планіметричного підрахунку площі областей з підфарбованою чорнилом рідиною з урахуванням перемішування з навколишнім середовищем. Встановлено, що співвідношення між висхідним і спадним потоками залежить від кута нахилу випускних отворів, ширини кристалізатора й типу заглибного стакану. Під час вдування газу крізь стопор, частка висхідного потоку зростає приблизно в 1,2-1,3 рази для випадку використання заглибного стакану з «пасткою».

При використанні ж стакану з «розсікачем», помітної зміни співвідношення між обсягом висхідного й низхідного потоку не спостерігалось. Для обох випадків приблизно до 20-25% від загальної кількості бульбашок газу, що вдувається, втягувалося вглиб рідкої ванни кристалізатора.

Загалом встановлено, що для заглибного стакану з «розсікачем» рух циркуляційних потоків відбувається більш направлено, ніж з «пасткою», а хвилеутворення за цих умов встановлюється на досить низькому рівні – близько 2-3 мм. Це дозволило рекомендувати заглибні стакани з «розсікачем» для промислового використання під час розливання сталей з наднизьким вмістом вуглецю.

**Третій розділ** «Математичне моделювання перемішування сталі в ковші та кристалізаторі слябової МБЛЗ». Розглянуті результати чисельного моделювання процесів перемішування металу в сталерозливному ковші й кристалізаторі МБЛЗ. Розробка математичної моделі виконана з використанням прикладного пакета Ansys, що реалізує метод кінцевих елементів у рамках модуля Flotran, який відображає CFD (Computerized Fluid Dynamics) технологію моделювання. Показано, що під час продувки рідкої ванни ковша через дві віддалені одна від одної продувні фурми динаміка переміщення циркуляційних потоків істотно відрізняється від продування через одну пробку. Перш за все, це знаходить своє пояснення в площині взаємодії циркуляційних потоків, які формуються висхідними струменями.

У початковий період продувки газорідинні потоки піднімаються вертикально вгору й утворюють ліворуч і праворуч малошвидкісні зони циркуляції, практично однакові за величиною. На певній стадії один з струменів частково захоплює інший, відхиляючи його від вертикалі й утворюючи одну потужну циркуляційну зону в основному об'ємі ковша, яка нагадує циркуляцію під час продувки через одну фурму. Частина другого струменя, що залишилася, утворює середньошвидкісну зону циркуляції в центрі нижньої частини розплаву. За цих умов

по ходу продувки спостерігається втрата стійкості циркуляційними потоками, що призводить до періодичної зміни траєкторії циркуляції та її інтенсивності.

Чисельні оцінки характеру перемішування рідкої ванни в ковші з великим значенням  $H/D$ , дозволили встановити, що для залучення в перемішування максимального об'єму рідини продувну фурму доцільно зміщувати до стінки ковша. Таке розташування фурми призводить до практично прямого виходу висхідного потоку на поверхню рідкої ванни, що обумовлює оголення дзеркала металу і його розбризкування. Для зниження негативних наслідків продувки через фурму, розташовану біля стінки ковша, представляється доцільним знизити питомі витрати газу через продувальний вузол, що відповідно зменшить інтенсивність обробки в цілому. Альтернативним рішенням, що дозволяє зменшити інтенсивність бурління в зоні виходу бульбашок газу на поверхню, є використання двох продувних вузлів, які сумарно забезпечують необхідну інтенсивність продувки. Для забезпечення високої ефективності продувки й запобігання захопленню шлакових вкраплень представляється доцільним рознесення продувних вузлів на таку відстань, за якої висхідні потоки не зливалися б у єдиний циркуляційний потік.

Запропонована в роботі тривимірна математична модель руху потоків металу в кристалізаторі МБЛЗ дозволила розширити можливості чисельних досліджень і порівняльних оцінок у частині оптимізації робочих параметрів заглибного стакану. Показано, що основна зона циркуляції в рідкій ванні кристалізатора, як правило, розташовується в області, яка лежить нижче заглибного стакану. Між тим, переміщення потоків у верхній частині кристалізатора за певних умов може супроводжуватися суттєвими хвилюваннями в області поверхні металу й захопленням циркуляційними потоками шлакових вкраплень у метал.

Узагальнення результатів розрахунків у вигляді полів векторів швидкості й траєкторій потоків наведено на рис.1. Глибина занурення стакану (відстань від дзеркала металу до осі симетрії вихідного отвору) приймалася рівною 110, 160, 210, 260 мм, а ширина кристалізатора – 1100, 1300, 1500, 1700 мм. При цьому швидкість розливання приймалася постійною (1,2 м/хв) для різних значень ширини сляба.

Встановлено, що за фіксованої ширини кристалізатора зі збільшенням глибини занурення розливного стакану від 160 до 260 мм зони турбулентності переміщуються в більш глибокі області рідкої ванни і їх вплив на підповерхневі шари рідини мінімізується. У той же час за глибини занурення стакану менше 160 мм досить велика частина потоку прямує вгору, що за певних умов сприяє формуванню додаткових вихрових течій в кутах кристалізатора й розвитку хвиль на дзеркалі металу. При збільшенні ширини сляба вплив висхідних потоків на підповерхневі шари металу зростає, що служить додатковою причиною розвитку хвиль на поверхні металу в кристалізаторі. Найбільш гармонійне співвідношення висхідних і спадних потоків, за нашими оцінками, установлюється за занурення стакану на глибину 200-210 мм.

Встановлені закономірності дозволяють розглядати глибину занурення розливного стакану в якості керуючого елемента для зниження забруднення сталі шлаковими вкрапленнями. Стосовно до розливання сталі з наднизьким вмістом вуглецю пропонується починати розливання на раціональній глибині

занурення розливного стакана (200-210 мм), а потім у міру заростання отворів і деформації циркуляційних потоків дещо збільшувати глибину занурення (наприклад, на 30-50 мм).

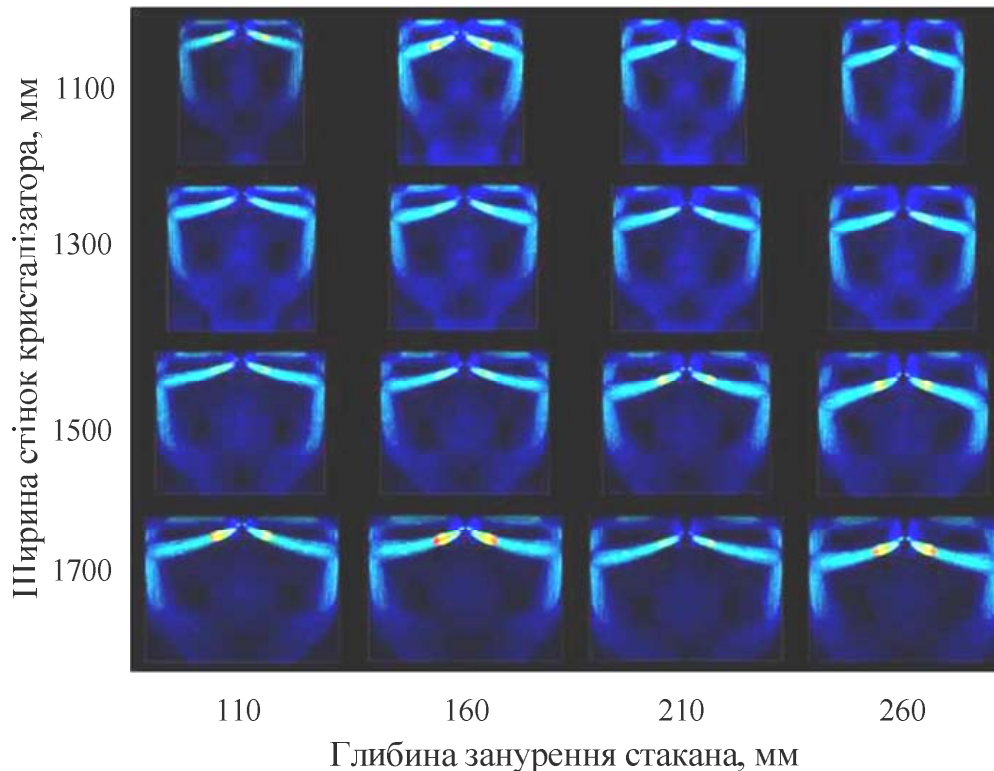


Рис.1. Розподіл полів векторів швидкостей в обсязі кристалізатора за різної глибини занурення стакана й ширини сляба

**Четвертий розділ** «Розробка комплексу технологічних операцій ковшової підготовки й розливання наднизьковуглецевих марок сталі». Систематизовано технологічні заходи й рішення, спрямовані на досягнення необхідної чистоти сталі за неметалевими вкрапленнями.

На базі промислових досліджень виконана кількісна оцінка ефективності системи відсікання пічного шлаку методом переливання з ковша в ківш. Встановлено, що попадання в ківш кінцевого пічного шлаку в кількості більше 300 кг (більше 1 кг/т сталі) значно впливає на втрати алюмінію, розчиненого в сталі, а також швидкість десульфурації і вимагає додаткового проведення досить тривалої операції дифузійного розкислення. Зменшення кількості пічного шлаку, який потрапив у сталерозливний ківш до рівня 160-300 кг (0,53-1,00 кг/т сталі) слід вважати недостатнім з позиції глибокої десульфурації сталі, яка необхідна для сталі з наднизьким вмістом вуглецю. Найбільш ефективними, на наш погляд, слід вважати методи відсікання пічного шлаку під час випуску сталі з конвертера, які забезпечують потрапляння в ківш до 100-120 кг шлаку. У цьому випадку вторинне окиснення металу не є відчутним.

Виконані в умовах конвертерного цеху ВАТ «АМК» оцінки показали, що під час випуску сталі з конвертера 15-20% шлаку потрапляє в ківш на початку випуску (під час повороту конвертера), 70-75% в кінці випуску з останніми пор-

ціями сталі, а решта шлаку потрапляє в ківш під час повороту конвертера у вихідний стан. Особливе значення має шлак, що потрапляє до ковша на початку випуску, оскільки він перемішується зі сталлю протягом усього періоду зливу металу. Для запобігання можливості попадання шлаку в ківш під час повороту конвертера запропоновано використовувати схему одноразового саморуйнівного «тампона», який встановлюється всередині сталевипускного отвору конвертера.

Можливість потрапляння шлакових часток в метал оцінювалася шляхом відбору проб на межі розділу шлак-метал промислового 300-тонного сталерозливного ковша. Для отримання достовірної інформації про кількість і форму шлакових вкраплень в обсязі металу був розроблений пробовідбирач, що містить рухому пробовідбираючу трубу, яка занурюється в метал. Відбір проб розплаву проводився після закінчення нагрівання сталі (23 хв.) і подачі шлакоутворювальних матеріалів (вапно – 800 кг, плавиковий шпат – 106 кг). Витрата вдуваного газу під час проведення експериментів становила 230 л/хв. на кожну фурму. При виборі точок відбору бралися до уваги дані про характер руху потоків металу у верхній частині рідкої ванни, які були отримані в ході фізичного та математичного моделювання.

Показано, що в процесі продувки в ковші аргоном у метал залучається певна кількість великих шлакових вкраплень розміром у кілька десятків мікрон. Геометрична форма таких вкраплень близька до кулястої або овальної, а розміри не перевищують 90-100 мкм. Враховуючи той факт, що під дзеркалом металу відбувається інтенсивне перемішування рідкої фази, представляється досить імовірним захоплення шлакових вкраплень конвективними потоками, які потім переносять їх углиб ковша. Такі вкраплення далеко не завжди повертаються в шлак під час подальшої продувки.

Для вивчення впливу продувки сталі аргоном у промковші на забрудненість її неметалевими вкрапленнями використовувалися спеціальні продувні блоки (балки), які встановлювалися в днищі. Вибір схеми розташування перегородок і продувних балок був здійснений у відповідності до даних фізичного моделювання. У результаті промислових досліджень показано, що найбільші відмінності в розподілі неметалевих вкраплень спостерігаються в показнику «точкові вкраплення». При цьому максимальний бал для дослідних і порівняльних слябів дорівнює 2. Однак у дослідних слябів кількість великих одиночних вкраплень (1,5 бали й вище) на 10-25% нижча. Ці неметалеві вкраплення є частинками захопленого в перемішування шлаку або конгломератами злиплих між собою часток оксидів (продуктів розкислення і вторинного окиснення) та сульфідів.

Показано, що зниження кількості таких неметалевих вкраплень можна забезпечити тільки шляхом реалізації комплексних заходів по всьому технологічному ланцюжку від зливу металу з конвертера до переливу його в кристалізатор. Стосовно до умов конвертерного цеху ВАТ «АМК» у промислове виробництво рекомендовані та впроваджені такі заходи:

– автоматичне газодинамічне відсікання шлаку під час зливу з конвертера, а також відсікання первинного шлаку із застосуванням «тампонів»;

- зниження інтенсивності продування до 140-150 л/хв на продувну фурму з метою запобігання бурлінню металу і шлаку в області виходу бульбашок аргону (при цьому цикл продування сталі в ковші збільшено в 1,8-2,0 рази (до 20-25 хв);
- продування сталі в промковші аргоном, з витратою його в межах 10-12 л/хв через спеціальні продувні балки, розташовані в днищі;
- оптимізація фізико-хімічних властивостей шлакоутворювальної суміші, що подається на дзеркало металу в кристалізаторі за рахунок підвищення її в'язкості та поверхневого натягу в рідкому стані;
- корегування положення розливного стакану в кристалізаторі за рахунок збільшення глибини його занурення на 30-50 мм за збільшення ширини слябу або появи хвиль на дзеркалі металу.

## ВИСНОВКИ

*В дисертації вирішене актуальне науково-технічне завдання по розвитку теорії продування металу аргоном і вдосконаленню технології позапичної обробки і розливання сталі, яке направлене на отримання металу з низьким вмістом шкідливих домішок і неметалевих вкраплень шляхом запобігання попаданню їх в метал в сталерозливному і проміжному ковші, а також в ході технологічних переливів. Розроблена і освоєна технологія виробництва наднизьковуглецевих сталей, досягнуто вміст вуглецю 0,006-0,020%.*

Основні наукові і практичні результати роботи:

1. Сталі з наднизьким вмістом вуглецю є одним з перспективних конструктивних матеріалів для виробів, що отримуються методом глибокої витяжки. Такі сталі містять мінімальну кількість азоту, кремнію і вуглецю, мають жорсткі обмеження за вмістом неметалевих вкраплень і є перспективними на світовому ринку металопродукції. В Україні до останнього часу був відсутній промисловий досвід виплавки сталі з наднизьким вмістом вуглецю, а також технічні умови реалізації цієї інноваційної технології. Для реалізації такої технології необхідно, з одного боку, використовувати чисті по домішках технологічні матеріали - металошихту, розкислювачі, легуючі і кисень, застосовувати глибоке зневуглецювання почали шляхом вакуумної обробки в ковші, забезпечити прецизійне легування, а з іншого боку – вирішити актуальну задачу по дослідженню процесів забруднення сталі домішками і неметалевими вкрапленнями на ділянці сталерозливний ківш – кристалізатор МБЛЗ і по організації заходів щодо запобігання їх попаданню в метал.

2. Встановлено, що для мінімізації рівня вмісту неметалевих вкраплень в сталі необхідно оптимізувати параметри перемішування рідкої сталі аргоном. Продування металу в сталерозливному ковші із збільшеним відношенням Н/Д рівним 1,30-1,40 незалежно від її інтенсивності приводить до оголення в середньому на 25-30% більшої площі «металу», ніж при  $H/D \approx 1$ , при витраті газу, що вдувається, в широкому діапазоні значень. Для мінімізації вторинного окиснення оголеної поверхні металу і захоплення вкраплень при продуванні інертним газом в умовах підвищених значень Н/Д ковша, необхідно знижувати інтенсивність продування і, як наслідок, збільшувати цикл обробки.

3. Показано, що альтернативним рішенням, яке дозволяє понизити інтенсивність вибування в зоні виходу бульбашок газу на поверхню, є використання двох або трьох продувальних вузлів, які сумарно забезпечують необхідну інтенсивність продування 150-600 л/хв. При цьому ефективність продування через дві фурми багато в чому визначається взаємним їх розташуванням в днищі ковша. Стосовно умов сталерозливного ковша ємкістю 300 т і із співвідношенням висоти наливу  $H$  до діаметру ковша  $D$  в межах 1,30-1,40 ця відстань повинна складати 1,8-2,0 м і більше.

Для забезпечення високої ефективності продування і запобігання захопленню шлакових вкраплень представляється доцільним розташування продувальних вузлів на такій відстані один від одного, при якому висхідні з них потоки газу не зливалися б в єдиний циркуляційний потік.

4. На фізичній моделі промківша виконані дослідження впливу різних конструктивних рішень (застосування перегородок, що фільтрують, металопріймача і продування аргоном та їх поєднання) на ефективність спливання неметалевих вкраплень в шлак. Встановлено, що для умов слябової МБЛЗ ВАТ «АМК» найбільш ефективним методом забезпечення чистоти сталі по неметалевих вкрапленнях є застосування комбінації «фільтраційна перегородка – продувальна балка» в сукупності з металопріймачем типу «турбостоп». При цьому спосіб продування аргоном крізь встановлені в промківші балки при витраті газу 10-12 л/хв на одну балку забезпечує ефективність видалення 91-94% неметалевих вкраплень у випадку, якщо циркуляційні потоки, що формуються металопріймачем і фільтраційною перегородкою, потрапляють в зону висхідних газорідних потоків у верхній їх половині. При цьому конвективні потоки металу, що формуються в зоні продування, повинні поступати переважно у верхню половину рідкої ванни (0,4-0,5 висоти наливу), що регулюється спеціально встановлюваними порогами.

5. Встановлено, що раціональний діапазон кута розкриття струменя, витікаючого з заглибного стакану в кристалізатор слябової МБЛЗ, складає 15-30°. У разі використання заглибного стакану з кутом розкриття 0-15° контакт із стінкою відбувається трохи нижче рівня меніска, і практично виключає утворення застійних зон, але при цьому коливання і оголення поверхні рідини набагато помітніші, ніж при використанні заглибного стакану з кутом розкриття 15-30°. Застосування стакану з кутом 30° є практично граничним значенням, яке можна рекомендувати для практичного застосування. При цьому контакт струменя із стінкою кристалізатора відбувається приблизно на  $\frac{1}{4}$  його висоти, а розподіл металу вгору і вниз не перешкоджає утворенню скориночки і не сприяє формуванню застійних зон, а хвилеутворення на поверхні металу мінімізується.

6. При вдуванні аргону крізь стопор з витратою 3-8 л/хв частка висхідного потоку зростає приблизно в 1,2-1,3 рази для заглибного стакану з «пасткою». При вдуванні газу через стакан з «розсікачем» помітні зміни співвідношення між об'ємом висхідного і низхідного потоку не спостерігаються. При цьому для обох випадків приблизно до 20-25% від загальної кількості вдуваних бульбашок газу залучається углиб рідкої ванни кристалізатора. Із збільшенням витрати аргону збільшується об'єм рідини у

висхідному потоці: при цьому основна частина аргону спливає до поверхні металу в кристалізаторі і створює додаткові збурення поверхні рідкої фази. Несиметричне витікання рідини з заглибного стакана, що виникає, наприклад, внаслідок заростання вихідних отворів, може приводити до виникнення воронкоподібних явищ під поверхнею дзеркала. Це обумовлює захоплення неметалевих вкраплень з шлакового покриття і залучення їх в рідку ванну заготівки.

7. Теоретичними і експериментальними дослідженнями показано, що зниження швидкості переміщення горизонтальних потоків під дзеркалом металу спостерігається при зменшенні ширини кристалізатора і збільшенні глибини занурення розливного стакана. Показано, що при фіксованій ширині кристалізатора із збільшенням глибини занурення розливного стакана від 160 до 260 мм зони турбулентності переміщуються в глибші області рідкої ванни і їх вплив на підповерхневі шари рідини мінімізується. При цьому зона циркуляційних потоків у верхній частині кристалізатора збільшується, а траєкторія руху відповідно подовжується. У той же час при глибині занурення стакана менше 160 мм достатньо велика частина потоків прямує вгору, де за певних умов сприяє формуванню додаткових вихрових течій в кутах кристалізатора і розвитку хвиль на дзеркалі металу. Так, для потоків, що рухаються вздовж стінки кристалізатора вгору, швидкість висхідного потоку для ширини 1100 мм склала 0,95-1,12 м/с, а для ширини 1500 мм – 1,18-1,40 м/с. Найбільш гармонійне співвідношення висхідних і низхідних потоків в рідкій ванні кристалізатора (для досліджених умов) встановлюється при зануренні стакана на глибину 200-210 мм. Ці закономірності дозволяють розглядати глибину занурення розливного стакана в якості управляючого чинника з точки зору запобігання забрудненню сталі шлаковими вкрапленнями. Стосовно розливання сталі з наднизьким вмістом вуглецю, пропонується починати розливання на раціональній глибині занурення розливного стакана (200-210 мм), а потім у міру заростання отворів і деформації циркуляційних потоків підвищувати глибину занурення (наприклад, на 30-50 мм).

8. В ході промислових експериментів встановлено, що для забезпечення максимального ефекту рафінування сталі в ковші необхідно мінімізувати кількість шлаку, що потрапляє в нього, на початковій стадії його наповнення на рівні 100-120 кг і менше. Встановлено, що попадання пічного шлаку в ківш в кількості більше 300 кг (більше 1,00 кг/т сталі) має значний вплив на угар алюмінію, розчиненого в сталі, а також швидкість десульфурації і вимагає додаткового проведення досить тривалої операції дифузійного розкислювання. Зменшення кількості пічного шлаку, що потрапив до сталерозливного ковша, до рівня 160-300 кг (0,53–1,00 кг/т сталі) слід вважати за недостатнім з позиції глибокої десульфурації сталі, яка потрібна для сталі з наднизьким вмістом вуглецю. Обмеження попадання шлаку на рівні 100-120 кг і менш може бути досягнуто шляхом установки в конвертерну лютку спеціальних пристосувань типу «тампонів», що саморуйнуються.

9. За допомогою розробленого пробовідбірника з промислового 300-тонного сталерозливного ковша в області, прилеглий до меж «ока», був



здійснений відбір проб з межі розділу шлак-метал. Встановлено, що у відібраних зразках переважають крупні вкраплення, що мають переважно сферичну або овальну форму при розмірах, що не перевищують 90-100 мкм. При цьому крупніші вкраплення розташовуються у верхніх шарах проби. Отримані результати були використані при проектуванні технології позапічної обробки сталі з наднизьким вмістом вуглецю (зокрема IF сталі). Так, інтенсивність продування при позапічній обробці сталі була обмежена в межах 140-150 л/хв на кожен фурму, а тривалість рафінуючого продування була збільшена в 1,8-2,0 рази (до 20-25 хвилин).

10. Показано, що в слябах із сталі з наднизьким вмістом вуглецю спостерігається певна кількість (15-20%) крупних неметалевих вкраплень округлої форми (точкові вкраплення, бал 2). Встановлено, що цими вкрапленнями є окиссульфідні конгломерати, які формуються в результаті спливання продуктів розкислювання і вторинного окиснення, а також захоплення частинок шлаку конвективними потоками з межі розділу «шлак-метал». Розміри вкраплень не перевищують, як правило, 40-50 мкм. Наявність такого роду вкраплень в рідкій ванні кристалізатора слід пов'язувати із спливанням продуктів розкислення і вторинного окиснення сталі до поверхні, де вони можуть бути повторно захоплені в перемішування горизонтальними і низхідними конвективними потоками.

11. В результаті проведених в умовах конвертерного цеху ВАТ «АМК» досліджень була розроблена і апробована технологія комплексної позапічної обробки сталі з наднизьким вмістом вуглецю в сталерозливному і проміжному ковші, що забезпечило задану якість металу по неметалевих вкрапленнях і шкідливих домішках шляхом раціонального поєднання фізико-хімічних, гідродинамічних і теплофізичних дій. Досягнутий вміст вуглецю 0,006-0,020%, сірки і фосфору - 0,007-0,015%, на 20-25% понижена кількість неметалевих вкраплень діаметром 90-100 мкм. Зокрема, впровадження заходів щодо усунення джерел попадання домішок в готову сталь на етапах її виплавки, обробки і розливання забезпечило підвищення конкурентоспроможності продукції комбінату за рахунок випуску слябів із сталей з високою додатковою вартістю. Фактичний річний економічний ефект від впровадження рекомендацій, що базуються на результатах дисертаційних досліджень, склав 9 423 000 грн. Частка автора - 10% (942 300 грн).

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Технология производства конвертерной стали с полиреагентным рафинированием / [Н.И.Тарасевич, С.Г.Мельник, Р.Я.Якобше, Е.А.Чичкарев, И.Д.Буга, В.В.Ивко, В.В.Акулов, К.Е.Писмарев] – К.:Информлитъе, 2010.– 350 с.

2. Писмарев К.Е. Особенности технологии производства стали для непрерывной разливки в условиях ОАО "Алчевский металлургический комбинат" / К.Е.Писмарев, В.В.Акулов, С.А.Сбитнев // Металлургическая и горнорудная промышленность.- 2006.- №8.- С.30-33.

3. Лейрих И.В. Тенденции развития и применения листовых сталей в ав-

томобилестроении / И.В.Лейрих, А.Н.Смирнов, К.Е.Писмарев // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Металургія.- 2007.- №9.- С.12-19.

4. Совершенствование технологии непрерывной разливки низкокремнистых сталей / Д.А.Дюдкин, В.В.Киселенко, В.В.Акулов, К.Е.Писмарев // Бюлл. ин-та «Черметинформация». Черная металлургия.- 2007.- №8. -С.35-37.

5. Смірнов О.М. Оцінка параметрів спіювання рафінуючого шлаку в сталерозливному ковш / О.М.Смірнов, В.М.Сафонов, К.Є.Пісмарьов // Металознавство та обробка металів.- 2008.- №1.- С.55-59.

6. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 1 / А.Н.Смирнов, Е.В.Ошовская, И.Н.Салмаш, В.М.Сафонов, К.Е.Писмарев // Процессы литья.- 2008.- №4.- С.41-48.

7. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 2. / А.Н.Смирнов, Е.В.Ошовская, И.Н.Салмаш, В.М.Сафонов, К.Е.Писмарев // Процессы литья.- 2008.- №5.- С.30-35.

8. Некоторые вопросы оценки интенсивности перемешивания при продувке металла в ковше инертным газом. Сообщение 3. / А.Н.Смирнов, Е.В.Ошовская, В.М.Сафонов, К.Е.Писмарев // Процессы литья.- 2009.- №5.- С.11-19.

9. Смирнов А.Н. Эффективность отсечки печного шлака при переливе стали из ковша в ковш / А.Н.Смирнов, К.Е.Писмарев, С.В.Куберский // Металлургическая и горнорудная промышленность.- 2010.- №1.- С.13-15.

10. Разливка стали на слябовых МНЛЗ с использованием смесей отечественного производства / С.В.Шлемко, С.В.Шостак, М.В.Епишев, В.И.Поремский, А.А.Кинаш, В.В.Акулов, К.Е.Писмарев // Металл и литье Украины.- 2010.- №9-10.- С.24-27.

11. Моделирование процессов поведения жидкой стали в кристаллизаторе слябовой МНЛЗ / А.Н.Смирнов, А.В.Кравченко, А.П.Верзилов, К.Е.Писмарев // Процессы литья.- 2010.- №5.- С.40-47.

12. Исследование характера распределения частиц металла в шлаке при продувке расплава аргоном в ковше / А.Н.Смирнов, В.М.Сафонов, Д.В.Проскуренко, К.Е.Писмарев // Электрометаллургия.- 2009.- №7.- С.17-22.

13. К вопросу о десульфурации стали в агрегате ковш-печь и камерном вакууматоре / В.М.Сафонов, А.Н.Смирнов, К.Е.Писмарев, Д.В.Проскуренко // Электрометаллургия.- 2009.- №11.- С.14-18.

14. Пат. 40737 Украина, МПК С 21 С 5/00 Пристрій для відбору проби розплаву з металургійної ємкості / Сафонов В.М., Смирнов А.Н., Писмарев К.Е.; заявитель и патентообладатель Донецкий национальный технический университет. - № 2008 12993; заявл. 10. 11. 08; опубл. 27.04.09. Бюл. №8.

15. Alchevsk Steel Works/Ukraine – The faster way to a modernized plant / T.Shevchenko, V.Mosolov, K.Pismarev // Proceeding 10<sup>th</sup> Continuous Casting Conference: CCC 08. 26-27 May 2008. Linz. – Siemens-VAI: 2009. – P.1-9.

16. Optimization of steel flow in CC submerged nozzle to reduce clogging phenomenon / A.Smirnov, A.Naumenko, K.Pismaryov // Proceeding 6th European

**Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві:**

[1] – виконані теоретичні і експериментальні дослідження процесів виплавки, обробки і безперервного розливання сталей покращеної якості (розділи 2-3); [2] – експериментальні дослідження по виробництву сталі для безперервного розливання; [3] – літературний і патентний пошук, участь в аналізі відібраних даних по виробництву зверхнизьковуглецевих сталей; [4] – визначення технологічних параметрів позапічної обробки і розливання низькокремнистої сталі; [5] – обґрунтування необхідності спінювання шлаку і обґрунтування порядку проведення експерименту, участь в обробці отриманих даних; [6,7,8] – розробка лабораторного стенду і методики досліджень, обґрунтування раціонального місця розташування продувальних вузлів і вибір витрати аргону при продуванні у великовантажних ковшах з відношенням висоти наливу  $H$  до діаметру ковша  $D$  в межах 1,30-1,40; [9] – розробка методики промислових досліджень, обробка експериментальних даних і видача рекомендацій по промисловій реалізації технології відсікання шлаку. Промислова оцінка впливу швидкості переливу сталі з ковша в ківш на ефективність відсікання шлаку; [10] – експериментальні дослідження ШУС і обробка результатів експериментів; [11] – виявлено стійкі вихрові структури потоків рідкої сталі в кутах широкої грані сляба, які сприяють утворенню стоячих хвиль на поверхні рідкої ванни і захвату металом шлакових вкраплень. Встановлено, що для слябових МБЛЗ мінімізації хвильових і вихрових явищ вдається досягти при глибині занурення розливного стакану 200-210 мм і більше; [12] – розробка нового методу дослідження розподілу шлакових вкраплень в металі, проведення експерименту, обґрунтування механізму захоплення і залучення углиб рідкої ванни шлакових вкраплень; [13] – обробка результатів промислових досліджень, розробка теоретичних і практичних рекомендацій по десульфурації сталі; [15] – розробка технологічної побудови конвертерного цеху, обґрунтування вибору устаткування і технологій для позапічної обробки і безперервного розливання сталі; [16] – дослідження гідродинаміки потоків в кристалізаторі при різних кутах розкриття струменя, витікаючого з заглибного стакану, обґрунтування глибини занурення стакану у ванну кристалізатора.

**АНОТАЦІЯ**

**Пісмарьов К.Є. Розвиток теорії продування металу аргонном і вдосконалення технології позапічної обробки та розливання наднизьковуглецевих сталей. – Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів. – ДВНЗ «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2011.

Вирішено актуальну науково-технічну задачу щодо розвитку теорії продування металу аргоном і вдосконаленню технології позапічної обробки і розливання зверхнизовуглецевих сталей, які направлені на отримання металу з низьким вмістом шкідливих домішок і неметалевих вкраплень шляхом попередження потрапляння їх в метал під час перебування його в сталерозливному і проміжному ковші, а також під час технологічних переливів. Розроблена та впроваджена технологія виробництва зверхнизовуглецевих сталей, досягнуто вміст вуглецю 0,006-0,020%.

При продуванні в сталерозливному ковші запропоновані заходи щодо зменшення обсягу застійних зон та затягування неметалевих вкраплень потоками сталі. Показано, що для умов слябової МБЛЗ найкращі результати рафінування досягаються при витраті аргону на одну балку в промквіші в кількості 10-12 л/хв.

В результаті проведених в умовах конвертерного цеха ВАТ «АМК» досліджень розроблена технологія виробництва зверхнизовуглецевих сталей. Економічний ефект від впровадження заходів становить 9 423 000 грн.

**Ключові слова:** наднизовуглецеві сталі, сталерозливний ківш, позапічна обробка, занурений стакан, продувний блок, неметалеві вкраплення.

## АННОТАЦИЯ

**Писмарев К.Е. Развитие теории продувки металла аргоном и совершенствование технологии внепечной обработки и разливки сверхнизкоуглеродистых сталей. - Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 - Metallurgy черных и цветных металлов и специальных сплавов. - ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2011.

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача по развитию теории продувки металла аргоном и совершенствованию технологии внепечной обработки и разливки стали, направленным на получение металла с низким содержанием вредных примесей и неметаллических вкраплений путем предотвращения попадания их в металл во время пребывания его в сталеразливочном и промежуточном ковше, а также в ходе технологических переливов. Разработана и освоена технология производства сверхнизкоуглеродистых сталей, достигнуто содержание углерода 0,006-0,020%.

В ходе экспериментальных исследований показано, что для минимизации уровня содержания неметаллических вкраплений в стали необходимо оптимизировать параметры перемешивания жидкой стали аргоном в сталеразливочном и промежуточном ковшах, а также оптимизировать движение конвективных потоков в кристаллизаторе.

Впервые выполнена промышленная оценка влияния скорости перелива стали из ковша в ковш (емкость ковша 300 т) на эффективность отсечки шлака. Показано, что в зависимости от скорости падения уровня металла (рас-

ход стали 15-30 т/мин) и количества выпускных отверстий (1 или 2) в нижний сталеразливочный ковш попадает от 100 до 300 кг печного шлака. Установлено, что процессы вторичного окисления металла попавшим в сталеразливочный ковш шлаком не получают значительного развития при его массе до 100-120 кг (0,33-0,40 кг/т стали).

Предложены усовершенствованные методы обработки стали в ковше с увеличенным отношением высоты налива металла к диаметру ковша ( $H/D \geq 1,30-1,40$ ), учитывающие тот факт, что в таких ковшах оголение зеркала увеличивается примерно на 30%.

Установлено, что для ковшей с большим значением  $H/D$  в придонной части формируется застойная зона, которая занимает 0,15-0,25 объема жидкой ванны и не вовлекается в перемешивание основным циркуляционным потоком. Размеры этой зоны могут быть значительно (до 50-60%) уменьшены за счет смещения продувочной пробки к стенке ковша.

На основе данных физического моделирования показано, что для условий двухручьевого слябовой МНЛЗ наиболее эффективным методом обеспечения чистоты стали по неметаллическим включениям является применение комбинации «фильтрационная перегородка – продувочная балка» в совокупности с металлоприемником типа «турбостоп».

Показано, что при обработке металла в 60-т промковше двухручьевого слябовой МНЛЗ наилучшие результаты рафинирования (эффективность удаления неметаллических включений составляет 91-94%) достигаются при расходе аргона на одну балку в количестве 10-12 л/мин.

При этом конвективные потоки металла, формирующиеся в зоне продувки, должны поступать преимущественно в верхнюю половину жидкой ванны (0,4-0,5 высоты налива), что регулируется специально устанавливаемыми порогам.

Выявлены устойчивые вихревые структуры потоков жидкой стали в углах широкой грани формирующегося в кристаллизаторе сляба, которые способствуют формированию стоячих волн на поверхности жидкой ванны и захвату металлом шлаковых включений.

Физическим и математическим моделированием установлено, что для слябовых МНЛЗ минимизации волновых и вихревых явлений удастся достигнуть при глубине погружения разливочного стакана 200-210 мм и более. При этом рациональной областью угла раскрытия струи, вытекающей из погружного стакана, являются значения в пределах 15-30°

Установлено, что в слябах из стали со сверхнизким содержанием углерода наблюдается 15-20% крупных неметаллических включений округлой формы (точечные включения балл 2), которые представляют собой оксисульфидные конгломераты, формирующиеся в результате всплытия продуктов раскисления и вторичного окисления, а также захвата частичек шлака конвективными потоками с границы раздела «шлак-металл» в сталеразливочном ковше и кристаллизаторе МНЛЗ. Проведены промышленные эксперименты по продувке стали аргоном в промковше и подтверждена возможность удаления неметаллических включений из стали при выборе рациональных режимов продувки.

Результаты проведенного исследования нашли практическое применение в разработке и апробировании технологии выплавки, внепечной обработки, продувки и разливки стали со сверхнизким содержанием углерода с ограниченным содержанием примесей и неметаллических включений в условиях конвертерного цеха ОАО «АМК», что обеспечило повышение конкурентоспособности продукции комбината.

В частности, внедрение мероприятий по устранению источников попадания примесей в готовую сталь на этапах ее выплавки, обработки и разливки обеспечило повышение конкурентоспособности продукции комбината. Фактический годовой экономический эффект от внедрения рекомендаций, базирующихся на результатах диссертационных исследований, составил 9 423 000 грн. Доля автора - 10% (942 300 грн)

Основные научные и практические результаты использованы ОАО «АМК» при формировании стратегии развития и реализации программы реконструкции сталеплавильного комплекса.

**Ключевые слова:** сверхнизкоуглеродистые стали, сталеразливочный ковш, внепечная обработка, непрерывная разливка, продувочный блок, неметаллические включения.

## ABSTRACT

**Pismaryov K.E. Development of argon mixing theory and implementation of secondary steelmaking and casting of ultra-low carbon steels technology.– Manuscript.**

Thesis for competition on a candidate degree in material science and engineering scientific on specialization in 05.16.02 - Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys. – SHSU «Donetsk National Technical University», Donetsk, 2011.

The thesis is devoted to the development of modern ideas about the possibilities of refining and pollution prevention non-metallic inclusions in modern steels with ultra-low carbon content (0,006-0,020%). These are minimum contain nitrogen, carbon and silicon, have severe restrictions on the content of non-metallic inclusions and are promising in the world market of metal products.

During the experimental studies had been show that for minimizing non-metallic inclusions content in steel is necessary to optimize the parameters of mixing of liquid steel and argon bubbling in ladle and tundish, and optimize traffic flow of metal in a mold. On the basis of physical modeling it was show that the conditions for the two strand slab caster most effective method of ensuring clean steel by non-metallic disseminations is the application combinations filtration wall, purging plug and metal box “turbostop”. Conducted experiments on industrial steel purging with argon in the tundish and confirmed the possibility of removing the non-metallic inclusions in steel when choosing a rational blow parameters.

**Key words:** ultra-low carbon steels, ladle, secondary metallurgy, continuous casting, purging plug, non-metallic inclusions.