

**Державний вищий навчальний заклад  
«Донецький національний технічний університет»**

**ШТЕПАН ЄВГЕН ВІКТОРОВИЧ**

**УДК 621.746.5**

**ВДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ І ПАРАМЕТРІВ ПЕРЕЛИВУ СТАЛІ  
З ПРОМІЖНОГО КОВША В КРИСТАЛІЗАТОР  
ВИСОКОШВИДКІСНОЇ СОРТОВОЇ МБЛЗ**

**Спеціальність 05.16.02 “Металургія чорних металів”**

**АВТОРЕФЕРАТ**

**дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук**

**Донецьк - 2007**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Державному вищому навчальному закладі «Донецький національний технічний університет» Міністерства освіти і науки 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,  
ДЮДКИН Дмитро Олександрович,  
ВАТ «Завод «Універсальне устаткування»  
(м. Донецьк), заступник директора з нової  
техніки та технології;

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

Захист відбудеться «25» жовтня 2007 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 11.052.01 Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, I навч. корпус, малий актовий зал.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет» за адресою: 83000, м. Донецьк, вул. Артема, 58, II навч. корпус.

Автореферат розісланий «  » вересня 2007 р.

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



О.В. Яковченко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Найважливішими проблемами виробництва сортової заготовки в сучасних умовах є підвищення якості, зниження енергоємності виробництва й собівартості готової продукції. У зв'язку із цим, дослідження, спрямовані на забезпечення вдосконалення процесів переливу сталі із проміжного ковша в кристалізатор, що впливає на стабільність процесів лиття, якість заготовки і продуктивність роботи сортової високошвидкісної МБЛЗ, заслуговують на особливу увагу.

Рішення питань, спрямованих на підвищення якості й зниження собівартості заготовки, можливе за рахунок детального вивчення організації і впливу струменя металу, що проникає в рідку ванну кристалізатора, на процеси кристалізації заготовки. Особливе значення такі процеси мають при одержанні заготовки малого перетину з високими швидкостями, коли різко збільшується негативний вплив струменя металу на процеси росту твердої скоринки. У зв'язку із цим, рішення важливого науково-технічного завдання по зменшенню негативного впливу струменя сталі на якість продукції і стабільність процесу розливання в умовах відхилення струменя від ідеального положення дозволить підвищити показники експлуатації сортових МБЛЗ і стане основою для створення ефективних вітчизняних агрегатів для одержання сортової продукції. Виконані в дисертації дослідження спрямовані на рішення поставленого завдання, що свідчить про актуальність теми.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Питання й проблеми, розглянуті в дисертаційній роботі, відповідають Державній програмі розвитку гірничо-металургійного комплексу України до 2100 року і Державній програмі енергозбереження. Виконання дисертації пов'язане із планами науково-дослідних робіт Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет». Основу дисертації становлять результати науково-дослідної роботи, що виконувалась при активній участі автора з 2002 по 2004 роки, (Д-4-03 «Розвиток наукових основ діагностики формування макро- і мікродефектів безперервнолітої заготовки з метою підвищення її конкурентоспроможності» № держреєстрації ДР 0103Г001425). Означена робота виконувалась при особистій участі здобувача як виконавця.

**Мета й завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є теоретичне обґрунтування й удосконалення технології й параметрів процесу переливу сталі із проміжного ковша в кристалізатор високошвидкісної сортової МБЛЗ, що дозволять підвищити якість заготовок і умови їх формування.

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

- вивчити умови гідродинаміки сталі в проміжному ковші, які визначають процес формування струменя металу, що проникає в рідку ванну кристалізатора;

- вивчити вплив організації струменя на ділянці «проміжний ківш - кристалізатор» на його параметри;

- встановити характер впливу струменя сталі на процеси кристалізації заготовки і її якість;

- розробити рекомендації, спрямовані на раціональну організацію переливу металу із проміжного ковша в кристалізатор;

- розробити рекомендації, спрямовані на зниження негативного впливу струменя металу на процеси кристалізації заготовки і її якість.

*Об'єкт дослідження.* Процеси переливу металу із проміжного ковша в кристалізатор, їх вплив на якість заготовки й процеси стабільності розливання.

*Предмет дослідження.* Гідродинамічні й теплофізичні аспекти формування струменя сталі, що проникає в кристалізатор МБЛЗ і його впливу на кристалізацію заготовки.

*Методи дослідження.* При виконанні роботи використані відомі методи дослідження: фізичне моделювання процесів переливу металу з проковша в кристалізатор і кристалізації заготовки, математичне моделювання процесів кристалізації заготовки, методи одержання заготовки на МБЛЗ, а також застосовувалися методи математичної статистики для обробки результатів експерименту.

### **Наукова новизна отриманих результатів**

1. Вперше встановлено, що при вдуванні аргону через стопор-моноблок проковша досягається зменшення глибини проникнення струменя металу у ванну кристалізатора в 1,5-2,0 рази. Максимальний ефект досягається при витратах аргону на рівні 1,5-2,0 л/хв. При збільшенні витрати глибина проникнення струменя зростає, що супроводжується підвищенням ступеня бурління меніска й, як наслідок, забруднення сталі неметалічними вкрапленнями.

2. Вперше встановлено, що вихрова воронка, яка формується в проковші при рівні наливу металу 300-400 мм, зберігається при подальшому підвищенні рівня металу до 600-700 мм і існує протягом 5-8 хв, що сприяє захопленню теплоізоляційної суміші й заростанню внутрішньої порожнини стакан-дозатора.

3. Отримали подальший розвиток уявлення щодо процесу впливу струменю сталі на нерівномірність кристалізації сортової заготовки, які свідчать, що збільшення кута нахилу струменя, що входить у ванну кристалізатора, понад 3 градусів, і зсув місця уведення струменя металу на 6% відносно вісі кристалізатора приводить до зменшення товщини скоринки

на виході із кристалізатора на 5-8%, що може визвати порушення геометричної форми заготовки, утворенню тріщин і проривів.

**Практичне значення отриманих результатів.** Практичне значення мають запропоновані режими й рекомендації щодо організації переливу металу з проміжного ковша в кристалізатор високошвидкісної сортової МБЛЗ, як безпосередньо під час розливання, так і при перековшовках, що дозволяють збільшити стійкість стаканів-дозаторів, а відповідно й серійність розливання. У результаті впровадження на МБЛЗ №2 ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф.Е.Дзержинського» запропонованих у дисертаційній роботі рекомендацій щодо обмеження падіння рівня металу в проміжному ковші в процесі перековшовки не менше 400 мм було збільшено кількість плавков, що розливаються, у серії в середньому на 1,12 плавки.

Крім цього, запропоновані витрати аргону, що вдувається в струмінь сталі через порожній стопор-моноблок, на рівні 1,5-2,0 л/хв, що в умовах МБЛЗ №2 ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф.Е.Дзержинського» дозволило підвищити вихід годного на 0,03%, внаслідок зниження нерівномірності кристалізації заготовки, виникнення тріщин, зміни профілю заготовки й зменшення числа проривів.

Рекомендації щодо підвищення стабільності процесу безперервного розливання використані АТ «Новокраматорський машинобудівний завод» при створенні базового проекту сортової шестиструмкової МБЛЗ.

**Особистий внесок здобувача.** Основні результати роботи отримані автором самостійно. У наукових працях, опублікованих по темі дисертації в співавторстві, безпосередньо автором виконане фізичне моделювання процесів, що відбуваються при безперервному розливанні, отримані результати дослідження процесу кристалізації заготовки з використанням створеної математичної моделі твердіння заготовки. Конкретний особистий внесок здобувача в цих роботах 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 обговорювалися на: «2-й Международной научно-технической конференции аспирантов и студентов» (м. Донецьк, 25-26 квітня 2002 р.); 1-й міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивные технологии непрерывной разливки стали: XXI век» (м.Донецьк, 28-30 травня 2002 р.); «II International Conference on Continuous Casting of Steel» (Krynica, Poland, June 16-18, 2004), міжнародній науковій конференції «Современные проблемы теории и практики производства качественной стали» (м.Маріуполь, 8-10 вересня 2004р.); 2-й міжнародній науково-технічній конференції «Прогрессивные технологии непрерывной разливки стали: XXI век» (м.Донецьк, 21-23 вересня 2004 р.), Восьмому конгресі сталеплавильників (м.Нижній Тагіл, 18-22 жовтня 2004р.), 3-й міжнародній

науково-технічній конференції «Прогресивные технологии непрерывной разливки стали: XXI век» (г. Донецьк, 31 жовтня -2 листопада 2006 р.)

**Публікації.** Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано у 15 наукових працях, у тому числі в 5 статтях наукових журналів, 3 статтях збірників наукових праць і 1 патенті України на винахід. З них 8 статей опубліковано в спеціалізованих наукових виданнях, включених у перелік ВАК України.

**Структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 100 найменувань і 3 додатків. Повний обсяг дисертації - 172 сторінки, загальний обсяг - 130 сторінок. У розділах дисертації 65 рисунків (у тому числі 9 на окремих сторінках) і 17 таблиць (у тому числі 7 на окремих сторінках).

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Перший розділ «Аналіз сучасних умов виробництва й вимог до якості сортової заготовки».** На підставі огляду науково-технічної літератури виконано аналіз сучасних способів отримання сортової заготовки, а також оцінка якості заготовки залежно від способів виробництва; розглянуті проблеми і перспективи отримання сортової заготовки на високошвидкісних МБЛЗ. У результаті проведеного аналізу способів одержання довгомірної продукції показано, що одержання сортової заготовки в Україні ведеться методом перекату зі злиwkів і на машинах безперервного лиття заготовки. Причому останній метод, маючи безсумнівні переваги, отримав все більше поширення.

Поряд із цим, відзначена тенденція виробництва безперервнолитої сортової заготовки з високими швидкостями розливання (більше 3 м/хв), що отримала поширення в останні роки і пов'язані із цим технологічні труднощі в забезпеченні якості заготовки й стабільності процесу розливання, які полягають у негативному впливі струменя металу, що проникає в кристалізатор, на процеси формування скоринки заготовки.

Обґрунтовано актуальність, визначено мету й завдання дослідження.

**Другий розділ «Дослідження процесу переливу металу з проміжного ковша в кристалізатор із застосуванням методів фізичного моделювання».** Виконано опис створеної на підставі теорії подібності фізичної моделі (рис. 1), призначеної для вивчення гідродинамічних процесів переливу металу із промковша в кристалізатор, а також процесів формування твердої скоринки заготовки в кристалізаторі.

З використанням фізичної моделі виконано дослідження процесу формування струменя металу, що перетікає з проміжного ковша в кристалізатор, на підставі яких зроблено висновок про вплив на

характеристики струменя наступних факторів: зміна внутрішнього діаметра стакан-дозатора, що викликає відхилення струменя від вертикальної вісі і розбризкування металу; утворення вихрової воронки, що сприяє закручуванню потоку сталі, що проникає з стакан-дозатора в кристалізатор.

На підставі даних фізичного моделювання процесів вихроутворення в проміжному ковші показано, що процес виникнення воронки характеризується наступними явищами: вихрова воронка отримує найбільший розвиток при безстопорному розливанні сталі. Із застосуванням стопора практично не виникає розвитої воронки, однак можливе зношування головки стопора внаслідок обертання довкола нього потоків сталі.

За даними фізичного моделювання виникнення вихрової воронки й зтягування шлакових часток починається вже при значенні напору рідини в промківші на рівні 300-400 мм.

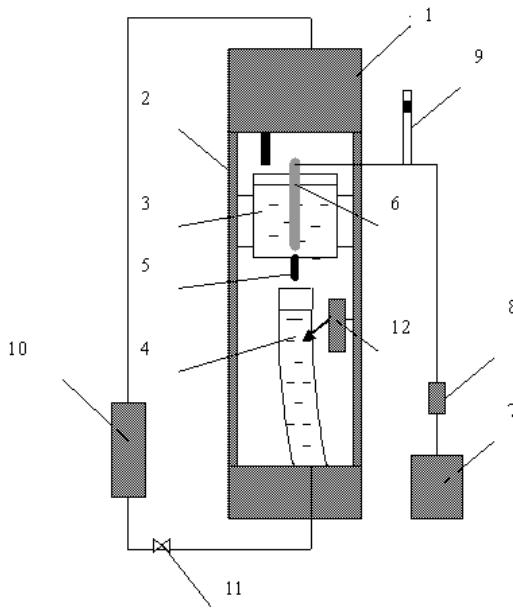


Рис. 1. Схема лабораторної установки для вивчення гідродинаміки потоків розплаву в порожнині кристалізатора криволінійної МБЛЗ:

- 1-резервуар; 2-опорні колони; 3-прозора модель проміжного ковша; 4-прозора модель кристалізатора; 5-стакан-дозатор; 6-стопор-моноблок; 7-

компресор; 8-ресивер; 9-ротамер; 10-насос; 11-пристрій синхронізації напорів рідини; 12-пристрій візуалізації й виміру швидкостей потоків

При виникненні вихрової воронки в промквіші можливо припинення серійного розливання внаслідок зміни діаметра каналу стакана-дозатора, порушення суцільності струменя («утворення віяла») і знижуються показники якості безперервнолитої сортової заготовки внаслідок розвитку вторинного окислювання й затягування шлакових часток у порожнину кристалізатора.

При «перековшовках» зі збільшенням рівня металу в промквіші стійка вихрова воронка зберігається до значення напору рідини 450-480 мм, а при наявності потоків у промквіші, що закручують, і до 520-550 мм. Закручування рідини навколо осі стакана-дозатора й затягування часток покривних шлаків і бульбашок повітря струменем рідини має місце при значенні напору рідини в промквіші рівному 600-700 мм. Завдяки тому, що ці значення напору зіставні з висотою наливу металу в промквіші при усталеній роботі МБЛЗ, подібні процеси можуть бути причиною затягування часток покривних шлаків у порожнину стакана-дозатора, що приводить до його заростання (рис. 2).

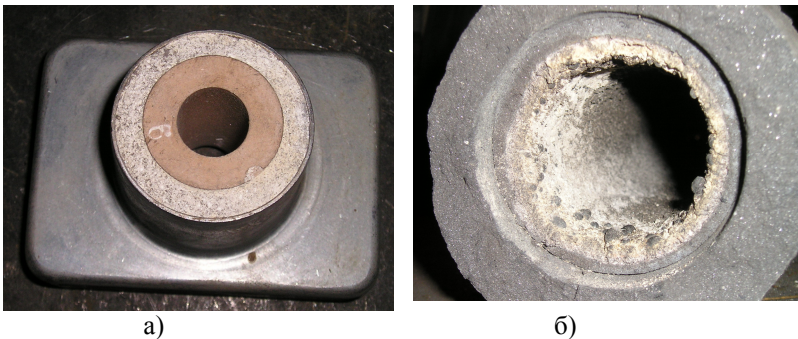


Рис. 2. Стан внутрішньої поверхні стакана-дозатора: а - новий стакан-дозатор; б- стакан-дозатор, що заріс.

Також виконано моделювання процесу витікання металу зі стакана-дозатора при його заростанні, у результаті чого відзначено, що на характеристики струменя значно впливає місце утворення настілю. При



місці розміщення настилу в нижній частині стакана-дозатора кут нахилу витікаючого з нього струменя збільшується приблизно в 2 рази й становить близько 6 градусів. Поводження струменя також залежить від форми настилу: гострі вкраплення не тільки змінюють характеристики потоку, але й приводять до закручування струменя. Величина рівня металу в проміжному ковші внаслідок зміни гідростатичного напору також впливає на параметри струменя - найбільш сприятливі умови витікання спостерігаються при рівні моделюючої рідини рівному 700 мм і більше. При падінні рівня характеристики струменя погіршуються.

**Третій розділ «Дослідження процесу формування безперервної заготовки в кристалізаторі сортової МБЛЗ».** Проведено дослідження факторів, що впливають на процеси кристалізації сортової заготовки. Відзначено, що для умов отримання сортової заготовки на високошвидкісний радіальної МБЛЗ особливо увагу необхідно приділяти впливу струменя на шкоринку затверділого металу.

У ході експериментів за допомогою фізичної моделі досліджували вплив на характер формування твердої шкоринки наступних параметрів:

-зсув струменя, що попадає із промковша в кристалізатор, щодо вертикальної осі симетрії;

-зміна кута нахилу струменя, що попадає із промковша в кристалізатор, щодо вертикалі;

-зміна швидкості руху й перетину струменя;

-умов перемішування металу в кристалізаторі при розливанні відкритим струменем і з заглибним стаканом.

Відзначено, що основними факторами, що впливають на нерівномірний ріст твердої шкоринки заготовки в кристалізаторі, є відхилення струменя від вертикальної осі симетрії, обумовлене зсувом стакана-дозатора. У ході фізичного моделювання встановлені критичні параметри зсуву й нахилу струменя, рівні 10 мм і 3° відповідно.

Показано, що більш сприятливі умови з позиції гідродинаміки рідкої ванни створюються при розливанні закритим струменем за допомогою заглибного стакана. При цьому ефект «гальмування» струменя металу в кристалізаторі досягається при вдуванні в нього 1,5-2,0 л/хв газу. Зниження або зростання витрати газу, що вдувається в струмінь сталі, приводить до збільшення глибини проникнення струменя металу у ванну кристалізатора (рис. 3).

Ефект гальмування струменя металу в кристалізаторі, при вдуванні в нього аргону, вивчався на фізичній моделі для розливання відкритим і закритим струменем. Результати досліджень дозволили виділити чотири основних режими поведінки водо-повітряної суміші у внутрішній порожнині

моделі стакана-дозатора (рис. 4), наявність яких багато в чому залежить від витрати повітря, що вдувається, і діаметра стакана-дозатора.

Для кожного з режимів характерною ознакою є розмір бульбашки газу, що переміщується в струмені рідини (Рис. 5).

Оскільки гальмування проникаючої в кристалізатор газо-рідинного струменя багато в чому залежить від діаметра бульбашок, і, як наслідок, від піднімальної сили, що протидіє силі ваги, з використанням залежності 1 були розраховані швидкості бульбашок з різним діаметром (Рис. 6).

$$V_{\text{бульб}} = \sqrt{\frac{\frac{4}{3} D_{\text{бульб}} (\rho_{\text{рід}} - \rho_{\text{газа}}) g}{\rho_{\text{рід}} K}} \quad , \quad (1)$$

де  $V_{\text{бульб}}$  - швидкість підйому бульбашки, м/с;

$D_{\text{бульб}}$  - діаметр бульбашки, м;

$\rho_{\text{рід}}$  - щільність рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{газа}}$  - щільність газу, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  - прискорення сили ваги, м/с<sup>2</sup>;

$K$  - коефіцієнт, що залежить від режиму течії.



а)



б)



в)

Рис. 3. Розподіл потоків моделюючої рідини в кристалізаторі криволінійної МБЛЗ при різних витратах повітря, що вдувається: а) - 2 л/хв; б) - 5 л/хв; в) - 0 л/хв

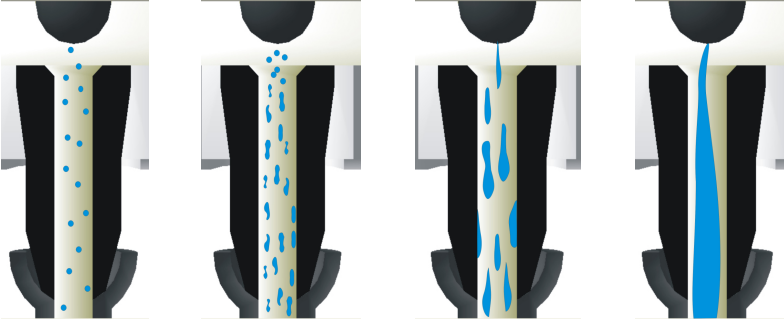


Рис. 4. Схематичне зображення поведінки бульбашок газу в порожнині стакана-дозатора

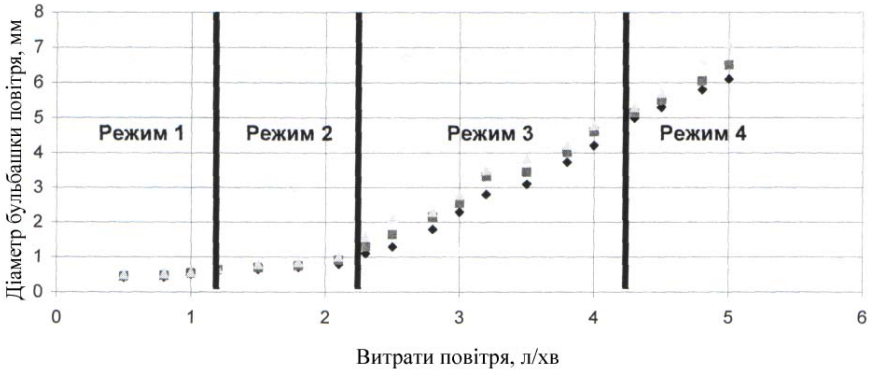


Рис. 5. Графічна залежність діаметра бульбашки повітря, що проникає в кристалізатор від витрати повітря при різних діаметрах внутрішньої порожнини стакана-дозатора:  $\blacklozenge$  діаметр стакана-дозатора – 16мм;  $\blacksquare$  - діаметр стакана-дозатора – 18 мм;  $\blacktriangle$  - діаметр стакана-дозатора 20мм

Розрахунки підтвердили висновки фізичного моделювання про наявність оптимуму витрати газу, що вдувається в струмінь сталі для зменшення глибини проникнення її в кристалізатор.

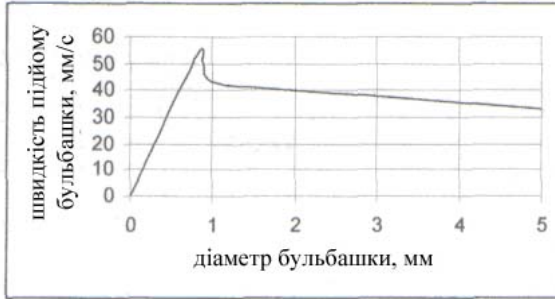


Рис. 6. Графічна залежність швидкості підйому бульбашки повітря від його діаметра

На підставі даних, отриманих за допомогою фізичного моделювання створено математичну модель кристалізації сортової заготовки, що дозволяє врахувати вплив гідродинаміки розплаву на процес твердіння. Теоретична основа моделі - стандартні рівняння теорії теплопереносу, що базуються на фундаментальних законах термодинаміки суцільних середовищ і фізики нерівноважних процесів.

Процеси теплопереносу в твердіючій безперервнолітій заготовці описуються рівнянням, що відображає енергетичний баланс у системі:

$$\rho C \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + V_x \frac{\partial T}{\partial x} + V_y \frac{\partial T}{\partial y} + V_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \rho L \frac{df_s}{d\tau}, \quad (2)$$

де  $T$  - температура, К;

$\tau$  - час, с;

$x, y, z$  - координати, м;

$V_x, V_y, V_z$  - компоненти швидкості, м/с (відмінні від нуля тільки в області рідкої фази);

$\rho$  - щільність сталі, кг/м<sup>3</sup>;

$C$  - питома теплоємність сталі, Дж/(кг·К);

$\lambda$  - теплопровідність сталі, Дж/(м·К·с);

$L$  - питома теплота кристалізації, Дж/кг;

$f_s$  - частина твердої фази.

Тому що об'єднання математичної моделі кристалізації заготовки і гідродинаміки струменя сталі, що проникає в кристалізатор, представляє

значні труднощі, то облік впливу струменя на затвердіння заготовки забезпечували в такий спосіб. На фізичній моделі визначали параметри гідродинаміки струменя в порожнині кристалізатора для випадків розливання із вдуванням аргону з різними витратами й без вдування аргону. У математичній моделі кристалізатор ділили на коаксіальні області (до 10 областей), для кожної з яких існувала можливість зміни величини коефіцієнта теплопередачі, а також на горизонтальні шари. Шляхом зміни коефіцієнта теплопередачі імітували процеси впливу струменя сталі, що проникає в кристалізатор із промковша, на скоринку затверділої заготовки.

Дослідження процесу впливу струменя сталі на кірку затверділої заготовки показало необхідність зниження глибини проникнення струменя в кристалізатор, тому що при відсутності цих заходів товщина кірки на виході із кристалізатора зменшується на 5-8%.

Крім того, зазначено, що для забезпечення сприятливих умов кристалізації заготовки варто контролювати точність центрування струменя металу щодо осі кристалізатора. Рекомендується не допускати відхилення струменя від вертикальної осі більш, ніж на 3°, і зсуву місця введення струменя до однієї зі стінок більш, ніж на 5-6% ширини кристалізатора.

**Четвертий розділ «Дослідно-промислові дослідження процесу переливу металу із проміжного ковша в кристалізатор МБЛЗ».** Вивчення процесу переміщення металу із проміжного ковша в кристалізатор було здійснено на базі сучасної блюмової шестиструмкової МБЛЗ №2 ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат» з можливістю одночасного одержання блюмової (335x400) і сортової заготовки (160x160). Метою дослідження було збільшення серійності плавок, що розливаються на МБЛЗ, за рахунок підвищення терміну служби стакан-дозатора промковша.

Було досліджено вплив висоти наливу металу в промківші на стійкість стакан-дозатора. При цьому протягом усього часу розливання рівень наливу металу в промківші витримували для різних плавок рівним 400, 500, 600 і 700 мм, а також розлили плавку, на протязі якої три рази знижували рівень металу з «робочого» - 700 мм до 300 мм, витримували протягом 5 хв, а потім підвищували до «робочого». Цим досягалася імітація процесу зміни розливного ковша - т.зв. «перековшівка».

Для оцінки зміни робочого перетину стакан-дозатора використовували коефіцієнт заростання:

$$K.з. = (S_{поч} - S_{кін}) / \tau, \quad (3)$$

де  $S_{поч}$  і  $S_{кін}$  - площа поперечного перерізу каналу стакан-дозатора до і після розливання, мм<sup>2</sup>;  
 $\tau$  - час розливання, хв.

Проведені дослідження, результати яких наведені в таблиці 1, свідчать про безсумнівний вплив рівня наливу металу в проміжному ковші на характеристики стійкості стакан-дозатора.

Таблиця 1

Характеристики стійкості стакан-дозатора при різних рівнях металу в промківші

Марка сталі	Рівень металу в промківші, мм	Тривалість розливання, хв	Заростання стакана, мм	Коефіцієнт заростання, $\times 10^2$
20 тр	400	105	25,17	1,11
20 тр	500	102	24,70	0,68
20 тр	600	94	24,31	0,32
20 тр	700	96	24,21	0,21
20 тр	700-300	98	24,86	0,87

Причому зниження рівня металу в промківші до 400 мм приводить до збільшення внутрішнього діаметра стакан-дозатора на 4,9%, що не забезпечує стабільності процесу розливання, особливо при розливанні методом «плавка на плавку». У випадку зниження рівня металу в промківші по ходу розливання з 700 до 300 мм (імітація перековшовки) внутрішній діаметр стакан-дозатора збільшується на 3,6% (при розливанні з рівнем наливу металу в промківші 700 мм цей показник становить 0,9%), викликаючи закручування струменя, що підтвердило правильність висновку, який зроблено в розділі 2, про вплив процесу перековшовки на стійкість стаканів-дозаторів і стабільність процесу розливання.

Оцінку впливу витрати аргону, що вдувається в струмінь сталі, на якість сортової заготовки виконували методом виміру твердої скоринки «панчох», отриманих при розливанні (зовнішній вигляд такої «панчохи» наведений на рис. 7, а результати вимірів товщини твердої скоринки при відсутності вдування аргону й величині витрати аргону - 1,5 л/хв наведені на рис.8)



Рис. 7. Зовнішній вигляд «панчохи»

В результаті виданих за підсумками проведених досліджень рекомендацій з оптимізації витрат аргону і по оптимізації рівня металу в промквішті стійкість стаканів-дозаторів на двох сортових струмках збільшилася на 8% або більш ніж на 1 плавку, а вихід годного на двох сортових струмках збільшився на 0,03%

Фактичний економічний ефект у цьому випадку склав 63900 грн/рік.

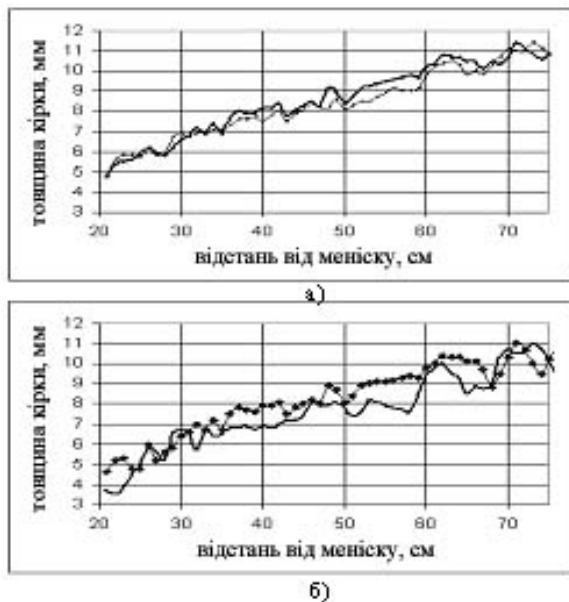


Рис. 8. Динаміка наростання кірки по двох протилежних гранях заготовки зі сталі 20тр при відсутності вдування аргону – (а); і витраті аргону 1,5 л/хв – (б)

## ВИСНОВКИ

У дисертації вирішене актуальне науково-технічне завдання по теоретичному обґрунтуванню й удосконаленню технології й параметрів процесу переливу сталі із проміжного ковша в кристалізатор високошвидкісної сортової МБЛЗ, які дозволять підвищити якість заготовок і умови їхнього формування.

Основні наукові й практичні результати роботи:

1. Виконано аналіз сучасних способів одержання сортової заготовки, а також оцінка якості заготовки залежно від способів виробництва; розглянуто проблеми й перспективи отримання сортової заготовки на високошвидкісних МБЛЗ. У результаті проведеного аналізу способів отримання довгомірної продукції показано, що отримання сортової заготовки в Україні ведеться методом перекату зі зливків і на машинах безперервного лиття заготовки. Причому останній метод, маючи безсумнівні переваги, одержує все більше поширення.



Відзначена тенденція виробництва безперервної заготовки з високими швидкостями розливання (більше 3 м/хв), що отримала поширення в останні роки, і пов'язані із цим технологічні труднощі в забезпеченні якості заготовки.

2. Створено фізичну модель для вивчення процесів переливу металу з проміжного ковша в кристалізатор сортової МБЛЗ, що дозволяє досліджувати гідродинаміку потоків у проміжному ковші й кристалізаторі. Відпрацьовано методику оптимізації процесів переливу металу з проміжного ковша в кристалізатор.

3. Вперше експериментальними методами встановлено, що вихрова воронка, що формується в промківші при рівні наливу металу 300-400 мм, зберігається при подальшому підвищенні рівня металу до 600-700 мм і існує протягом 5-8 хв, що сприяє захвату теплоізоляційної суміші й заростанню внутрішньої порожнини стакан-дозатора. З метою уникнення утворення вихрової воронки рекомендовано не знижувати рівень металу в промковше при перековшовах нижче 500 мм і оптимізувати потоки металу, виключивши їх вплив, що сприяє утворенню воронки.

4. Запропоновано пояснення механізму заростання цирконового стакан-дозатора, нейтрального до хімічного зтягування. Показано, що механізм фізичного заростання пов'язаний із проникненням у порожнину стакан-дозатора холодного повітря й шлакових часток, що може бути наслідком утворення вихрової воронки.

5. За допомогою методів фізичного й математичного моделювання досліджено процес впливу струменя сталі на корку твердіючої в кристалізаторі заготовки й встановлено, що збільшення кута нахилу струменя, що входить у ванну кристалізатора, понад 3 градуси, і зсув місця введення струменя металу на 6% щодо вісі кристалізатора приводить до зменшення товщини скоринки на виході із кристалізатора на 5-8%, що призводить до порушення геометричної форми заготовки, утворенню тріщин і проривів.

6. Уперше експериментальними й розрахунковими методами встановлено, що при ддуванні аргону крізь стопор-моноблок промковша досягається зменшення глибини проникнення струменя металу у ванну кристалізатора в 1,5-2,0 рази. Максимальний ефект досягається при витратах аргону на рівні 1,5-2,0 л/хв. При збільшенні витрати глибина проникнення струменя зростає, що супроводжується підвищенням ступеня бурління меніска й, як наслідок, забруднення сталі неметалічними включеннями.

7. Показано, що наявність оптимальної витрати аргону, що ддується крізь стопор-моноблок, пов'язане з діаметром бульбашок, що проникають у кристалізатор і пов'язане з ним піднімальною силою, що протидіє проникненню струменя металу у ванну кристалізатора.

8. Рекомендації щодо оптимізації процесів переливу металу із проміжного ковша в кристалізатор високошвидкісної сортової МБЛЗ використано при виробництві заготовки перетином 160x160 мм в умовах шестиструмкової МБЛЗ №2 ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф.Е.Дзержинського» з можливістю одночасного отримання блюмової (335x400) і сортової заготовки (160x160), а також при створенні базового проекту високошвидкісної МБЛЗ ВАТ «Новокраматорський машинобудівний завод».

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

1. Еронько С.П., Штепан Е.В., Зуб В.В. Физическое моделирование процессов перемешивания металла в кристаллизаторе МНЛЗ // *Металлургическая и горнорудная промышленность.*- 2002.- №10.- С. 92-94.
2. Влияние условий разливки на характер затвердевания непрерывной сортовой заготовки / А.Н.Смирнов, Е.В.Штепан, С.П.Еронько, А.Ю.Цупрун // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Металургія.* – Донецьк: ДонНТУ, 2004.- Вип. 73.- С. 47-53.
3. К вопросу изменения рабочего диаметра стакана-дозатора при непрерывной разливке стали / А.Н.Смирнов, Е.В.Штепан, И.А.Орлов, Е.Ю.Жибоедов // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія.* – Донецьк: ДонНТУ, 2004.- Вип. 77.- С. 43-49.
4. Исследование условий стабильности функционирования системы дозирования стали в проковше МНЛЗ / С.П.Еронько, И.А.Орлов, Д.А.Яковлев, Е.В.Штепан, А.В.Сидоров // *Металлургическая и горнорудная промышленность.*- 2004.- №8.- С. 126-129.
5. Технологическое развитие параметров высокоскоростной разливки стали на сортовых МНЛЗ / А.Н.Смирнов, Е.В.Штепан, Г.И.Касьян, А.Я.Миц // *Металлургическая и горнорудная промышленность.*- 2004.- №8.- С. 140-143.
6. Некоторые особенности развития вихреобразных потоков при истечении металла из проковша / Г.А.Редько, А.Н.Смирнов, Е.В.Штепан, Е.Ю.Жибоедов // *Металлургическая и горнорудная промышленность.*- 2004.- №8.- С. 180-183.
7. Процессы воздействия инъекции аргона в струю стали на качество непрерывнолитой сортовой заготовки / Е.В.Штепан, Г.А.Редько, В.Е.Ухин, А.В.Науменко, Е.Ю.Жибоедов // *Наукові праці ДонНТУ. Серія: Металургія.* – Донецьк: ДонНТУ, 2005.- Вип. 102.- С. 56-62.
8. Особенности автоматической системы стопорной розливки стали для сортовой МНЛЗ / А.Н.Минтус, А.Ю.Цупрун, Д.А.Денисенко, Е.В.Штепан // *Металл и литье Украины.* - 2006.- №1.- С.69-73

9. Патент на винахід №74507. МКВ М22D41/56. Пристрій для заміни стакан-дозатора проміжного ковша машини безперервного лиття заготовок / С.П.Єронько, О.М.Смірнов, Цупрун О.Ю., Штепан Є.В., Білобров Ю.М., Сусь Ю.В., Плугатарь В.С., Тиунов В.М. - Опубл. 15.12. 2005. Бюл.№12.

10. Технологическое развитие параметров высокоскоростной разливки стали на сортовых МНЛЗ / А.Н.Смирнов, Г.И.Касьян, А.Я.Мицц, Е.В.Штепан // Труды восьмого конгресса сталеплавателей (г.Нижний Тагил, 18-22 октября 2004г.).- Москва, 2005.-С.484-491.

11. Штепан Е.В., Ухин В.Е., Жибоедов Е.Ю. Физическое моделирование процессов затвердевания сортовой заготовки в кристаллизаторе МНЛЗ // Зб. трудів 3-ї міжнародної науково-практичної конференції «Прогресивні технології у металургії сталі: XXI сторіччя».- Донецьк: ОАО «Норд Пресс», 2005.- С.384-388.

12. Штепан Е.В., Науменко А.В., Ухин В.Е. Исследование процессов воронкообразования при переливе металла из промковша в кристаллизатор МНЛЗ // Металлургия и обработка металлов (выпуск 8). Материалы научно-технической конференции.- Донецк: ДонНТУ, 2005. – С.31-32.

13. Modeling geometry behavior of billet ingots during solidification /Ye. Smirnov, A.Smirnov, Ye.Shtepan, M.Grigoriev, G.Redko // II International Conference on continuous casting of steel. Technology. Modelling. Defects of CCS ingots.- Krynica, 2004. P.36-40.

14. Смирнов А.Н., Штепан Е.В., Жибоедов Е.Ю. Влияние условий разливки на характер затвердевания непрерывнолитой сортовой заготовки // Современные проблемы теории и практики производствакачественной стали. Тезисы докладов Международной научной конференции.- Мариуполь: ПГТУ, 2004. С.167-169.

15. Штепан Е.В., Абакумов Д.В. Усовершенствование системы подачи аргона через стопор-моноблок промежуточного ковша при разливке стали на МНЛЗ // Автоматизація технологічних об'єктів та процесів. Пошук молодих. Збірник наукових праць II Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м.Донецьку 25 – 26 квітня 2002р.- Донецьк: ДонНТУ, 2002. С.299-301.

#### **Особистий внесок здобувача в опублікованих роботах:**

[1-2] - Створено фізичну модель для дослідження процесів проникнення струменя металу в кристалізатор сортової МБЛЗ. Виконано фізичне моделювання процесів проникнення струменя металу в кристалізатор сортової МБЛЗ. Отримано результати щодо зменшення глибини проникнення струменю сталі в рідку ванну кристалізатора при вдунання в неї (1,5-2,0) л/хв. аргону. [3] - Виконано дослідження механізму

заростання стакана-дозатора.[4] - Створено модель проміжного ковша МБЛЗ. [5] - Виконано фізичне моделювання процесу впливу струменя металу, що проникає в кристалізатор високошвидкісної МБЛЗ на формування скоринки заготовки. [6] - З використанням створеної фізичної моделі для вивчення процесів переливу металу із промковша в кристалізатор досліджено процеси воронкоутворення в промковші сортової МБЛЗ, отримано результати щодо поведінки вихрової воронки при зростанні рівня металу в проміжному ковші. [7] - Виконано дослідження з оптимізації витрат аргону, що вдувається в струмінь сталі крізь стопор-моноблок. Отримано результати щодо впливу параметрів відхилення струменя сталі, що проникає в кристалізатор на динаміку твердіння. [8] - Досліджено показники якості сортової заготовки при розливанні відкритим і закритим струменем. [10] - Виконано фізичне моделювання процесу впливу струменя металу, що проникає в кристалізатор високошвидкісної МБЛЗ на формування скоринки заготовки. [11] – Виконано дослідження процесів нерівномірності затвердіння сортової заготовки. [12] - З використанням створеної фізичної моделі для вивчення процесів переливу металу із промковша в кристалізатор досліджено процеси воронкоутворення в промковші сортової МБЛЗ, отримано результати щодо поведінки вихрової воронки при зростанні рівня металу в проміжному ковші. [13] - Виконано фізичне моделювання процесу виникнення напруг у скоринці безперервнолітої заготовки. [14] - Виконано фізичне моделювання процесу твердіння безперервнолітої заготовки. [15] - Досліджено процес подачі аргону крізь стопор-моноблок проміжного ковша при розливанні сталі на МБЛЗ.

## АНОТАЦІЯ

**Штепан Євген Вікторович. Вдосконалення технології і параметрів переливу сталі з проміжного ковша в кристалізатор високошвидкісної сортової МБЛЗ. - Рукопис.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 - Металургія чорних металів. - Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», Донецьк, 2007.

Розроблено рекомендації щодо вдосконалення технології і параметрів процесу переливу сталі з проміжного ковша в кристалізатор сортової високошвидкісної МБЛЗ.

Вирішено актуальну науково-технічну задачу щодо теоретичного обґрунтування і вдосконалення технології і параметрів процесу переливу сталі з проміжного ковша в кристалізатор сортової високошвидкісної МБЛЗ,

які дозволяють поліпшити якість заготовок і умови їх формування. Для умов конвертерного цеху ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат ім. Ф.Е.Дзержинського» виконані й передані рекомендації щодо підтримання рівня металу в проміжному ковші в процесі перековшовки не менш 400 мм, що дозволило збільшити кількість плавок, що розливаються в серії в середньому на 1,12 плавки, а також рекомендації щодо підтримання витрати аргону, який вдувається у струмінь сталі крізь полий стопор-моноблок, на рівні 1,5-2,0 л/хв., що дозволило підвищити вихід годного на 0,03%.

Ключові слова: безперервнолита заготовка, проміжний ковш, кристалізатор, стакан-дозатор, вихрова воронка, струмінь.

## АННОТАЦІЯ

**Штепан Євгеній Вікторович. Усовершенствование технологии и параметров перелива стали из промежуточного ковша в кристаллизатор высокоскоростной сортовой МНЛЗ. - Рукопись.**

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 - Metallurgy черных металлов. - Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», Донецк, 2007.

Разработаны рекомендации относительно усовершенствования технологии и параметров процесса перелива стали из промежуточного ковша в кристаллизатор сортовой высокоскоростной МНЛЗ.

Решена актуальная научно-техническая задача по теоретическому обоснованию и усовершенствованию технологии и параметров процесса перелива стали из промежуточного ковша в кристаллизатор высокоскоростной сортовой МНЛЗ, которые позволят повысить качество заготовок и условия их формирования.

Создана физическая модель для изучения процессов перелива металла из промежуточного ковша в кристаллизатор сортовой МНЛЗ, позволяющая исследовать гидродинамику потоков в промежуточном ковше и кристаллизаторе. Отработана методика оптимизации процессов перелива металла из промежуточного ковша в кристаллизатор.

Показано, что вихревая воронка, формирующаяся в промковше при уровне налива металла 300-400 мм, сохраняется при дальнейшем повышении уровня металла вплоть до 600-700 мм и существует в течение 5-8 мин, что способствует захвату теплоизоляционной смеси и зарастанию внутренней полости стакана-дозатора.

Предложено объяснение механизма зарастания цирконового стакана-дозатора, нейтрального к химическому затягиванию. Показано, что механизм

физического зарастания связан с проникновением в полость стакана-дозатора холодного воздуха и шлаковых частиц, что может являться следствием образования вихревой воронки.

Для условий конвертерного цеха ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э.Дзержинского» выполнены и переданы рекомендации относительно поддержания уровня металла в промежуточном ковше в процессе перековшовки не менее 400 мм, что позволило увеличить количество плавов, которые разливаются в серии, в среднем на 1,12 плавки.

Отмечено, что при вдувании аргона через стопор-моноблок промковша достигается уменьшение глубины проникновения струи металла в ванну кристаллизатора в 1,5-2,0 раза. Максимальный эффект достигается при расходах аргона на уровне 1,5-2 л/мин. При увеличении расхода глубина проникновения струи возрастает, что сопровождается повышением степени бурления мениска и, как следствие, загрязненности стали неметаллическими включениями.

Показано, что наличие оптимального расхода аргона, вдуваемого через стопор-моноблок, связано с диаметром пузырьков, проникающих в кристаллизатор и связанной с ним подъемной силой, противодействующей проникновению струи металла в ванну кристаллизатора.

Для условий конвертерного цеха ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат им. Ф.Э.Дзержинского» выполнены и переданы рекомендации относительно поддержания расхода аргона, который вдувается у струю стали через полый стопор-моноблок, на уровне 1,5-2,0 л/мин, что позволило повысить выход годного на 0,03%. Наряду с этим, рекомендации относительно организации перелива металла из промежуточного ковша в кристаллизатор использованы АО «НКМЗ» при создании базового проекта сортовой МНЛЗ.

С помощью методов физического и математического моделирования исследован процесс влияния струи стали на корочку затвердевающей в кристаллизаторе заготовки и установлено, что увеличение угла наклона струи, входящей в ванну кристаллизатора, свыше 3 градусов, и смещение места ввода струи металла на 6% относительно оси кристаллизатора приводит к уменьшению толщины корочки на выходе из кристаллизатора на 5-8%, что приводит к нарушению геометрической формы заготовки, образованию трещин и прорывов.

Ключевые слова: непрерывнолитая заготовка, промежуточный ковш, кристаллизатор, стакан-дозатор, вихревая воронка, струя.

**ABSTRACT**

**Shtepan Eugeny Victorovich. Improvement of technology and parameters of steel flowing from tundish in mold of high-speed billet CCM. - Manuscript.**

Thesis for competition on a candidate degree in material science and engineering scientific on specialization in 05.16.02 - Metallurgy of ferrous metals. – State higher educational establishment «Donetsk National Technical University», Donetsk, 2006.

Recommendations in relation to the improvement of technology and parameters of process of steel flowing from tundish in mold of high quality high-speed billet CCM are developed.

The actual scientific and technical task of improvement of technology and determination of parameters of process steel flowing from tundish in mold of high-speed billet CCM are developed is decided, which allow to improve quality of billet and condition of their forming. For the terms of converter workshop of «Dnepr metallurgical works of F.E.Dzerginskogo» LTD are executed and passed to recommendation in relation to maintenance of level of metal in an tundish in the process of casting no less than 400 mm, that allowed to multiply the quantity of heats which spill in a series, on the average on a 1,12 heat and recommendation in relation to maintenance of expense of argon which is blown at stream of steel through a hollow stopper, at the level of 1,5-2,0 l/min, that allowed to promote the output of suitable on 0,03%.

Keywords: billet, tundish, mold, submerged entry nozzle, vortex, stream.