

УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУК І ТЕХНОЛОГІЙ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
"ІНСТИТУТ ПРОМИСЛОВИХ ТА БІЗНЕС ТЕХНОЛОГІЙ"

Рябий Дмитро Валерійович

УДК 669.01.53:621.74.047

**СТАБІЛІЗАЦІЯ ВИТІКАННЯ СТРУМЕНЮ МЕТАЛУ СОРТОВОЇ МБЛЗ
ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ УМОВ РОБОТИ
СТАКАНА-ДОЗАТОРА**

Спеціальність 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів
та спеціальних сплавів»

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України, м. Київ

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Смірнов Олексій Миколайович,
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
НАН України (м. Київ),
завідувач відділу магнітної гідродинаміки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Костецький Юрій Віталійович
Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона
НАН України (м. Київ),
провідний науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент
Єфімова Вероніка Гаріївна,
Національний технічний університет України КПІ
ім. Ігоря Сікорського (м. Київ)

Захист відбудеться «25» квітня 2024 р. об 11⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 у Інституті промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій, за адресою: м. Дніпро, пр.Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту промислових та бізнес технологій Українського державного університету науки і технологій за адресою: 49010, м. Дніпро, вул. Ак. Лазаряна, 2.

Автореферат розісланий «19» березня 2024 р.

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

Л. В. Камкіна

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Сучасні технології безперервного розливання припускають підвищення питомої продуктивності, яка досягається за рахунок налагодженого часового циклу на ланцюгу «плавильний агрегат-установка позапічної обробки сталі-МБЛЗ».

В останнє десятиліття ринок довгомірної продукції розвивається швидше, ніж будь-коли. При цьому вимоги споживачів посилюються як щодо якості продукції, так і щодо продуктивності нових і експлуатованих МБЛЗ. Тому основним напрямом розвитку технології розливання на сортових МБЛЗ є пошук таких технологічних рішень і прийомів, оптимізація яких забезпечує гарантоване отримання бездефектних безперервнолитих заготовок і максимальну продуктивність при зниженні виробничих витрат.

Однак збільшення продуктивності сортової МБЛЗ вище проектних значень вимагає додаткових досліджень та науково-обґрунтованих рішень у частині оптимізації роботи проміжного ківша та кристалізатора. Отже, вирішення науково-технічного завдання з теоретичного обґрунтування вибору раціональних параметрів та вдосконалення технології процесу безперервного розливання сортової заготовки на багаторівчачових МБЛЗ з підвищеною продуктивністю є актуальним завданням, вирішення якого забезпечить суттєвий енерго- та ресурсозберігаючий ефект в умовах нарощування виробництва та зниження питомих витрат.

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

Матеріали дисертаційної роботи є узагальненням наукових результатів, отриманих автором при виконанні науково-дослідних робіт, проведених в Державному вищому навчальному закладі (ДВНЗ) «Донецький національний технічний університет» (до 30.09.2014 р.): «Дослідження особливостей гідродинамічних, теплових, кристалізаційних та деформаційних процесів, що супроводжують формування твердої скоринки безперервнолитої заготовки у кристалізаторі МБЛЗ» (Державна тема Д-11-10, 2010-2011 р.); а також у Фізико-технологічному інституті металів і сплавів Національної академії наук України: «Розробка наукових основ створення нового покоління високоефективних мультіфункціональних МГД проміжних ківшів для МБЛЗ металургійних мікрозаводів» (Державна тема №0117U002689, від 21.03.2017) та «Розробка наукових і технологічних основ електромагнітного переливу металу з проміжного ківша у кристалізатор МБЛЗ малонапорним струменем» (Державна тема № 0120U100134 від 24.01.2020 р.)

Мета і завдання дослідження. Встановити раціональні параметри безперервного розливання сталі на багаторівчачовій сортовій МБЛЗ при литті відкритим струменем довгими серіями на підвищених швидкостях, що забезпечить зниження питомих витрат вогнетривів і знизить відсорткування безперервно литої заготовки за поверхневими дефектами на основі нових уявлень впливу технологічних факторів, що в свою чергу впливають на заростання порожнини «калібрувальної» вставки стаканів-дозаторів, а також їх

зношування, що внаслідок призводить до порушення компактного витікання струменя металу на ділянці «верхній стакан-дозатор – кристалізатор».

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

- дослідити основні причини прояву порушення витікання струменя металу (дефект «віяло») в процесі розливання серії на багаторівчачкових сортових МБЛЗ;

- оцінити вплив технологічних факторів на стабільність процесу розливання, та ступень впливу утворення «віяла» та відхилення струменя металу від вертикалі по ходу розливання металу.

- провести дослідження утворення вікнин в багаторівчачковому проміжному ківші.

- дослідити характер заростання стаканів-дозаторів, що супроводжується порушенням компактності витікання струменя металу при використанні вогнетривких компонентів футерівки і пристроїв проміжного ківша, які широко застосовуються у теперішній час;

- запропонувати для заводів з розливанням сортової заготовки відкритим струменем за допомогою систем швидкої заміни дозаторів (ШЗД) комплекс раціональних параметрів і рішень, що забезпечують підвищення продуктивності МБЛЗ та зниження відсорткування металу за поверхневими дефектами за рахунок підвищення стабільності витікання струменя металу на ділянці «верхній стакан-дозатор – кристалізатор» з оптимізацією умов роботи кристалізатора проміжного ківша.

Об'єкт дослідження. Процес безперервного розливання сталі відкритим струменем на багаторівчачковій сортовій МБЛЗ із застосуванням системи швидкої зміни стаканів-дозаторів (ШЗД) для дозування металу та регулювання швидкості розливання.

Предмет дослідження. Гідродинамічні та тепломасообмінні процеси на ділянці «верхній стакан-дозатор – кристалізатор» та порушення компактності витікання струменя металу, що приводить до хвилеутворення на поверхні меніска в кристалізаторі.

Методи дослідження. Дослідження виконані з використанням теорії тепло- та масопереносу металургійних розплавів і шлаків, і теорії перемішування металургійних розплавів. Фізичне моделювання процесів витікання металу зі «стакана-дозатора», а також ерозійного зносу робочого шару футерівки проміжного ківша виконали з урахуванням основних критеріїв гідродинамічної подоби. При експериментальних дослідженнях використовували термометрування об'єкта дослідження у промислових та лабораторних умовах. Обробку експериментальних даних, а також математичне моделювання гідродинамічних процесів безперервного розливання, здійснювали з використанням пакетів прикладних програм Microsoft Excel і Ansys.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Надали розвиток уявлення про виникнення і розвиток ефекту розбризкування металу при високошвидкісному розливанні сталі відкритим струменем на сортових машинах з використанням системи швидкої зміни

стаканів-дозаторів. Встановлено, що незадовільне розливання металу та заміна стакана-дозатора на інший, виникає внаслідок утворення настилів (заростання) на внутрішній порожнині стаканів-дозаторів. Максимальна частота «віяла» струменя металу припадає на період після відкриття шибера сталерозливного ківша, коли рівень металу в ньому максимальний ($\approx 40\%$ випадків у перші 10 хв). У наступні періоди (11-20) та (21-30) хв. частота «віяла» знижується.

2. Вперше було з'ясовано, що в умовах сучасного розливання сталі відкритим струменем на багаторівчачовій МБЛЗ на початку розливання серії металу, при якій застосовуються верхні стакани-дозатори діаметрами 19,0-21,0 мм і нижні стакани-дозатори діаметром 18,0-19,5 мм для набору швидкості розливання, доцільно застосовувати нижні стакани-дозатори з «калібрувальними» вставками без закруглення. Це дозволить знизити ймовірність заростання каналу нижнього стакана-дозатора неметалевими вкрапленнями вогнетривкого походження. Однак у ході розливу серії збільшення діаметра «калібрувальної» вставки верхнього стакана-дозатора і виходу МБЛЗ на оптимальний швидкісний режим розливання, що супроводжується зміною нижніх стаканів-дозаторів на менші діаметри (16,0-17,5 мм в залежності від перетину заготовки, що розливається) доцільно застосовувати нижні стакани-дозатори, «калібрувальна» вставка яких буде мати округлення в місці стику з верхнім стаканом-дозатором.

3. Розширено уявлення щодо мінімізації ймовірності осідання на внутрішній порожнині «калібрувальної» вставки нижнього стакана-дозатора продуктів плавки, а також для забезпечення компактності струменя металу через стакан-дозатор. Розроблена оригінальна формула розрахунку оптимального радіусу кривизни лійки «калібрувальної» вставки для нижніх стаканів-дозаторів, які найбільш часто використовуються на підприємствах металургійної галузі.

4. Вперше були розроблені, виготовлені та випробувані вітчизняні «калібрувальні» вставки для нижніх стаканів-дозаторів із композиційного матеріалу, що складається з вихідних компонентів BN і V_4C , а також «вторинного» нітриду бору з ромбоєдричною кристалічною решіткою, отриманої при азотуванні V_4C в процесі реакційного спікання в азоті.

Практичне значення отриманих результатів. Практичне значення мають розроблені, вироблені і випробувані «калібрувальні» вставки для нижнього (змінного) стакана-дозатора як базового складу, де за рахунок змінення радіусу кривизни лійки, вдалося мінімізувати розвиток несиметричних циркуляційних потоків, а також за рахунок впровадження стартових дозаторів з нетиповим хімічним складом «калібрувальної» вставки (BN і V_4C), що значно зменшує заростання їх порожнини відкладеннями неметалевих включень і як наслідок проявів «віялового» струменя.

Запропонована нова схема футерівки проміжного ківша з використанням розроблених нестационарних воронки у розливних вузлах є ефективним технологічним рішенням, спрямованим на зниження кількості «віялових струменів» не тільки через затягування вихрових структур різного масштабу з ванни металу проміжного ківша в канал дозатора, але і через попадання в канали дозаторів продуктів руйнування футерівки проміжного ківша та цирконової

вставки верхніх дозаторів. Крім того, запропонована схема забезпечує роздільне за часом автовідкриття пар рівчаків без використання стартових засипок і кисню для пропалювання каналів дозаторів, що помітно спрощує процедуру старту. Річний очікуваний економічний ефект складає більш ніж 3185178, 9 грн / рік.

Розроблені та запропоновані автором принципи і методики моделювання гідродинамічної картини руху розплаву при розливанні сталі через швидкозмінні стакани-дозатори на багаторівчачковій сортовій МБЛЗ, можуть бути використані на різних підприємствах металургійної галузі, в тому числі і при створенні нових видів вогнетривких виробів для високопродуктивних МБЛЗ, а також у якості освітнього матеріалу для фахових спеціалістів металургійної галузі в процесі підготовки.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є самостійною роботою автора і базується на опублікованих результатах досліджень. Основні експериментальні дані і наукові положення дисертаційної роботи одержані і сформульовані автором особисто. Автором розширено уяву про закономірності характеру утворення розбризкування металу при його витіканні із змінного стакана-дозатора при розливанні сталі відкритим струменем на високопродуктивних МБЛЗ. На підставі цього, здобувачем було розроблено та впроваджено низку технологічних і конструктивних заходів, які за принципом комплексного підходу зменшили до 30 % прояв дефекту витікання струменя типу «віяло».

Конкретний особистий вклад автора в роботах, опублікованих у співавторстві і у вигляді коротких анотацій після вказівки їх номерів у списку опублікованих робіт за темою дисертації.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення і результати дисертації обговорювалися на науково-практичній конференції молодих учених та студентів «Наукові дослідження молоді – інновації в науці та практиці». Маріуполь, 2013; на V науково-практичній , конференція молодих вчених України "Нові ливарні технології і матеріали у машинобудуванні", Запоріжжя, 2014; на сьомій міжнародній конференції студентів та аспірантів «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» – Київ, 2014. – С.45.; на міжнародному металургійному форумі «Наука та інновації», 3 жовтня 2017 р. м. Київ, XVI міжнародній конференції вогнетривників і металургів, на 63-й Міжнародному колоквиуму з вогнетривків «Refractories enabling High Temperature Technologies», 16-17 вересня 2020 р. м. Аахен (Німеччина).

Публікації. Основні результати дисертації викладені в 11 публікаціях, в тому числі: 9 статей у наукових журналах, 2 тези доповідей на науково-практичних конференціях, 1 патент України. 7 статей опубліковано у спеціалізованих наукових виданнях, що відповідають переліку МОН України, 2 статті у зарубіжних наукових виданнях в тому числі 1 стаття входить до наукометричної бази Scopus.

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел (148 найменувань) та додатків. Повний обсяг дисертації – 176 сторінок. У розділах дисертації 67 рисунків, 28 таблиць та 1 додаток.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, представлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, а також дані про апробацію та публікацію основних результатів дисертаційної роботи.

У *першому розділі* «Аналіз сучасних технологій безперервного розливання сортової заготовки і тенденції їх розвитку» наведено характеристику другого технологічного переливання сталі між проміжним ківшем та кристалізатором на сортових МБЛЗ, та розглянуті переваги та недоліки різних схем дозування металу. Відзначені конструкційні та експлуатаційні особливості сучасних систем дозування металу, а також визначені найбільш поширені системи для дозування металу при сортовій розливці відкритим струменем, та представлено розгорнутий аналіз системи дозування металу.

Необхідно відзначити, що дозування металу із застосуванням систем швидкої зміни стаканів-дозаторів (ШЗД) отримало широке впровадження і добре зарекомендувало себе завдяки забезпеченню стабільного швидкісного режиму розливання довгими серіями за рахунок швидкої зміни стаканів-дозаторів.

Однак у науковій літературі практично відсутні роботи, спрямовані на дослідження закономірностей розвитку «несуцільності» (порушення компактності) витікання струменя металу по ходу розливу серії металу на МБЛЗ. Тому поглиблення теоретичних знань у частині порушення компактності струменя в процесі безперервного розливання сталі, а також вироблення практичних рекомендацій, які можуть бути впроваджені на заводах з розливом сталі відкритим струменем носять досить актуальний характер.

Другий розділ «Основні моделі, методика і методи дослідження» присвячений розробці фізичних та математичних моделей для моделювання процесів витікання струменя на ділянці «стакан-дозатор-кристалізатор» при розливці відкритим струменем, комплексного моделювання утворення вікниноподібних явищ при переливі металу з проміжного ківша в кристалізатор за допомогою систем ШЗД та моделювання зносу футерівки проміжного ківша, що призводять до заростання каналу стакан-дозатора, а також залежність цього зносу від турбулентного переміщення металу.

Для візуального вивчення характеру витікання металу через сталерозливний вузол проміжного ківша і пов'язаних з цим процесів перенесення рідини з проміжного ківша в кристалізатор з світлопроникного матеріалу (оргскло) була створена фізична модель верхнього (постійного) і нижнього (змінного) стакан-дозатора. Масштаб моделі для нижнього стакан-дозатора прийнято 1:1. Загальний вигляд моделюючого стенду, який імітує сталерозливний вузол із встановленим механізмом швидкої зміни стакан-дозатора, наведено на рисунку 1.

В основі дослідження виступало застосування «калібрувальних» вставок з різним ступенем зносу та різного ступеня заростання, які були вилучені з відпрацьованих стаканів-дозаторів після 1,5, 4 і 9 годин безперервного

розливання, що дозволяє оцінити вплив ступеня зносу і заростання цирконієвої вставки на розвиток порушень компактності витікання струменя металу.

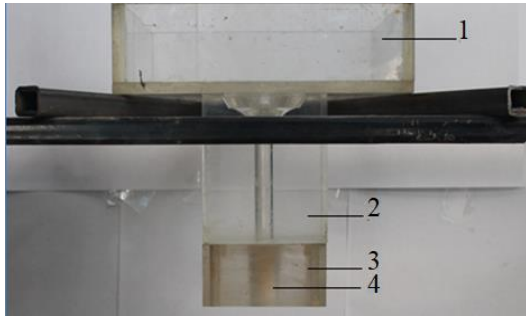


Рисунок 1 - Загальний вид лабораторної установки: 1 - імітуючий простір проміжного ківша над рівчаком, 2 - верхній стакан-дозатор. 3 - нижній стакан-дозатор, 4 - «калібрувальна» цирконієва вставка стакана-дозатора

протікають при заростанні внутрішніх порожнин цирконієвих вставок «стакана-дозатора» в процесі розливання. Це призводить до зміни характеру витікання. При цьому порушується симетричність витікання металу, що в свою чергу виступає передумовою для виникнення збурень на поверхні металу в кристалізаторі, і як наслідок призводить до утворення наплесків і набризків сталі на стінки кристалізатора.

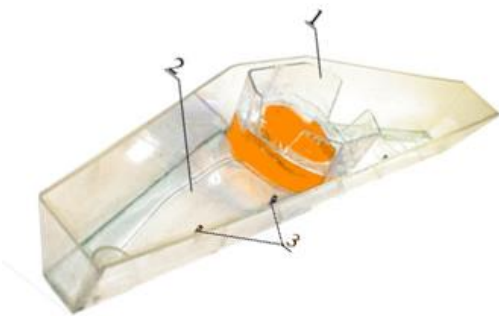


Рисунок 2 – Загальний вид лабораторної установки: 1 - модель металоприймача типової конструкції; 2 - модель проміжного ківша; 3 - отвори які імітують стакани-дозатори

застосовуваним в промисловості конструкційним зі світлопроникного матеріалу (оргскла). При виконанні моделювання висота наливу рідини у виконаній моделі могла варіюватися в діапазоні 0,1-1,5 від номінальної висоти металу в проміжному ківші (від 100 до 700 мм).

Рух потоків рідини, що витікає через порожнини стаканів-дозаторів фіксувався за допомогою цифрової відеокамери і за рахунок підфарбовування локальних об'ємів рідини кольоровим чорнилом. У якості робочої рідини, що моделює рідку сталь, використовувалася вода при температурі 18-25°C. У ході фізичного моделювання вивчалися особливості руху потоків у порожнині стаканів-дозаторів, їх вплив на розвиток дефектів «віял» струменя металу, внаслідок чого розвиваються процеси хвилеутворення на поверхні кристалізатора.

Прояв порушень компактності витікання струменя металу (дефект «віяла»), слід зв'язувати з процесами, що

У роботі також вивчали процес залучення неметалевих включень з поверхні металу під дією вікниноподобних явищ руху металу за допомогою створеної прозорої моделі проміжного ківша при розливанні відкритим струменем. Як імітатори покривного шлаку використовували частинки пінопласту і силіконове масло. Для візуального вивчення характеру розвитку утворення воронкоподібних явищ, які сприяють затягуванню неметалевих включень з поверхні металу, була виготовлена фізична модель проміжного ківша з металоприймачем типової конструкції, який відповідає найбільш відомим і

При проведенні досліджень зносу робочого шару футерівки проміжного ківша для кількісної оцінки зносу були застосовані зразки матеріалу, що розмивається на основі інвертного цукру та желатину.

Зношування типових зон торкрет шару проміжного ківша впродовж часового інтервалу, а також залежність цього зношення від турбулентного переміщення металу від «бійного» місця до периферійних стінок було вивчено і проаналізований на моделі за допомогою розташування експериментальних зразків у різні зони проміжного ківша та імітації розливання протягом 15 хвилин.

У другому розділі отримали підтвердження результатів фізичного моделювання яке виконувалося на математичній моделі. Метою виконаних досліджень була розробка достовірно-надійної та прогнозуючої математичної основи для вивчення процесів масопереносу, який відбувається при високошвидкісному розливанні сталі відкритим струменем через стакани-дозатори. Розробка математичної моделі виконана з використанням прикладного

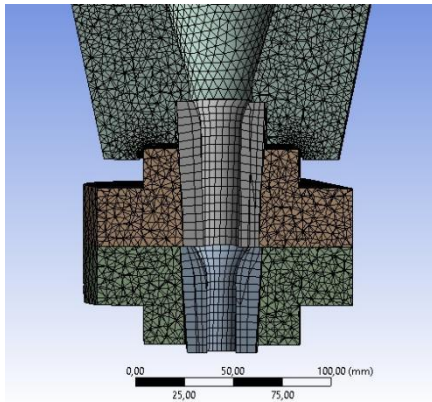


Рисунок 3 - Загальний вигляд кінцево-елементної моделі розрахункової області верхнього та нижнього (змінного) стакана-дозатора сортової МБЛЗ.

пакету ANSYS, що реалізує метод кінцевих елементів (МКЕ) в рамках модуля Flotran, який відображає CFD (Computational fluid dynamics) технологію моделювання. В якості розрахункової області при створенні геометричної моделі був прийнятий внутрішній обсяг «калібрувальних» вставок стаканів-дозаторів, заповнений рідкою сталлю (рисунок 3).

Всі напрями досліджень можна умовно розділити на такі групи: гідродинамічні явища при витіканні сталі через сталерозливний вузол проміжного ківша (стакани-дозатори); переміщення сталі в промковші (траєкторії руху та швидкості потоків розплаву, неметалічних включень); температурний стан розплаву при перемішуванні (теплоперенесення), масоперенесення.

Виконані розрахунки за допомогою розробленої математичної моделі, дозволяють вибрати оптимальну геометрію «калібрувальної» вставки стакана-дозатора, що дозволяє досягти стабільного витікання металу з проміжного ківша в кристалізатор без утворення «віялових» явищ струменя і хвилеутворення на поверхні металу в кристалізаторі.

У третьому розділі «Моделювання характеру поведінки розплаву під час високошвидкісної розливиці з застосуванням швидкозмінних стаканів-дозаторів» вивчені закономірності виникнення «віяла» металу. Була приділена увага щодо частотного розподілу «віяла» по 7 рівчакх МБЛЗ ПАТ «Камет-сталь». Встановлено, що на центральних рівчакх Р3,4,5 де інтенсивність циркуляційних потоків від струменя, що витікає з проміжного ківша максимальна, частота випадків «віяла» металу також максимальна. Мінімум проявів віялових явищ припадає на середні рівчакх Р2,6 (рисунок 4).

Максимальна частота «віяла» струменя металу припадає на період після відкриття шибера сталерозливного ківша, коли рівень металу в ньому максимальний ($\approx 40\%$ випадків у перші 10 хв).

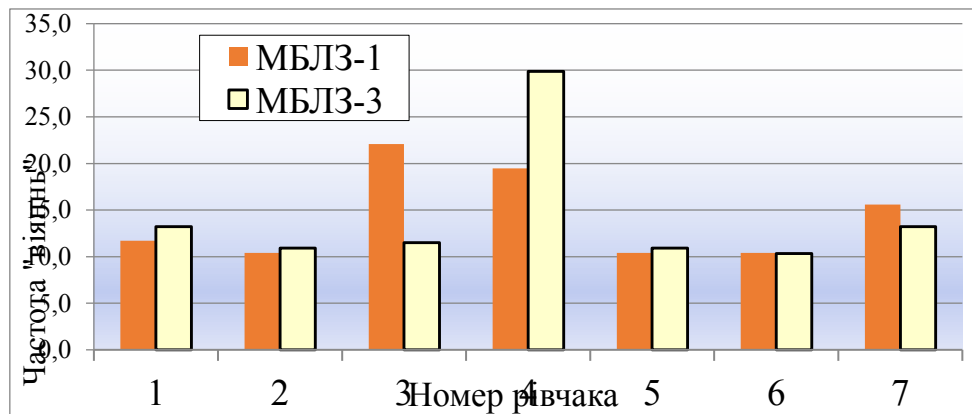


Рисунок 4– Частотний розподіл «віял» по ривчаках МБЛЗ-1,3

У наступні періоди (11-20) та (21-30) хв. частота «віяла» знижується. Діаграма розподілу «віялових явищ» відображена на рисунку 5.

Отже, при реалізації стратегії максимально можливого підвищення швидкостей розливання металу відкритим струменем проблема «віяла» струменя з урахуванням сильного і нелінійного характеру впливу швидкості розливання на частоту «віяла» струменя металу без подальшого вивчення питання розробки відповідних технологічних заходів буде лише посилюватись.

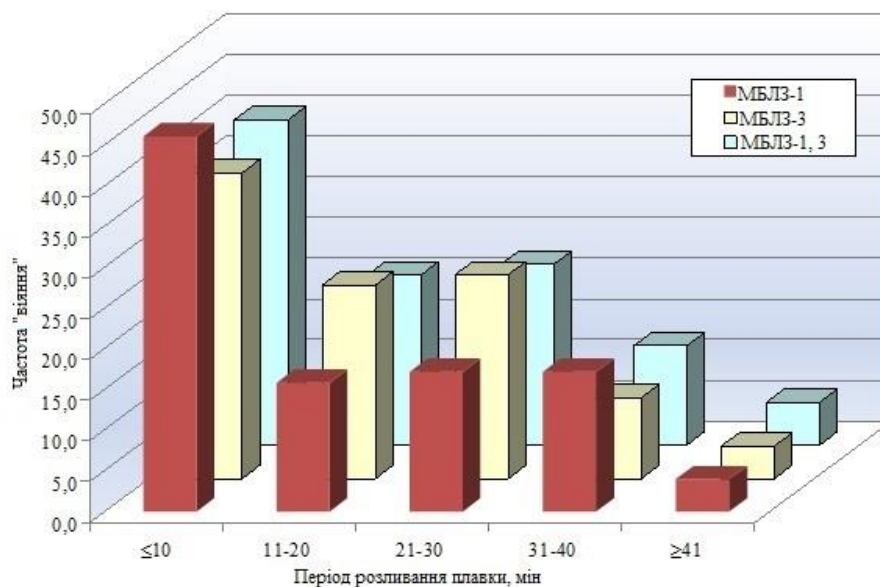


Рисунок 5 - Частотний розподіл «віял» за тривалістю розливання плавки

З метою подальшого вивчення проблематики виникнення явища «віяла» струменя в процесі розливання серії металу було проведено додатково два дослідження. Перше дослідження спрямоване на вивчення впливу зносу футерівки проміжного ківша на процес утворення явища «віяла» струменя в ході розливання серії. Друге дослідження спрямоване на вивчення питання вікниноутворення в проміжному ківші, яке призводить до затягування неметалевих

включень у порожнину стаканів-дозаторів, їх заростання і як наслідок утворення «віяла» струменя. В результаті аналізу встановлено, попадання в канал дозатора продуктів руйнування футерівки промківша, а саме набивної маси, що формує лійку в розливних вузлах, над верхнім дозатором, і робочого торкрет-покриття (рисунок 6).

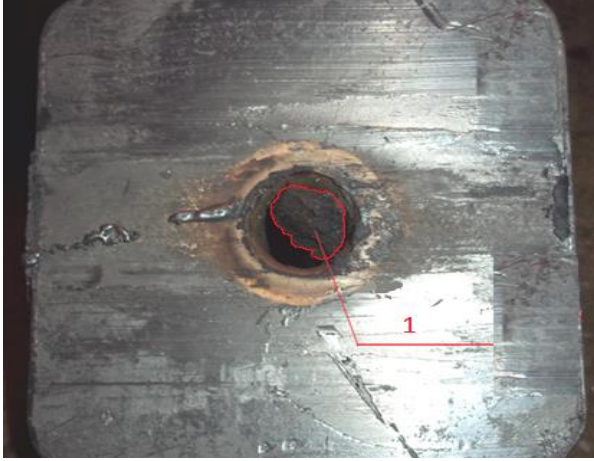


Рисунок 6 - Стакан-дозатор, відібраний з «віялового» струмка із фрагментом футерівки в розливному каналі. 1- фрагмент футерівки в порожнині «калібрувальної» вставки

Для «стартових віялів», характерних для перших плавок серій, екзогенні НВ, що спостерігаються в каналах дозаторів, мають вигляд відносно пухких, частково заметалених фрагментів футерівки, що відшарувалися (торкрет або набивної маси з розливного вузла), нерідко зі сфероподібними включеннями заліза у виді крапель. Зазначені виділення металу є типовими для відкладень НВ на стінках дозаторів при затягуванні.

Результати хімічного аналізу макро-НВ, вилучених з каналів змінних дозаторів на яких були помічені «віялові» явища

представлені в таблиці 1. Методика визначення згідно з ДСТУ 30511.5-97.

Таблиця 1 – Хімічний аналіз неметалевих включень зі стаканів-дозаторів, на яких були виявлені «віяло» струменя металу

Зразки НВ з каналів дозаторів		MgO	SiO ₂	CaO	Fe _{общ.}	Щільність, г/см ³
		49,7	22,1	3,8	3	2,7
		38,1	19,5	7	18,7	3,3
		42,2	20,6	3,9	20,7	3,4
Маркування Торкрет-маси	Phlox Spray	71	21	3,1	2,9*	1,5**
	Kermag	62	30	2,1	4,7*	1,5**
	Dalgun	64	24	2,5	5,5*	-

* Fe₂O₃; ** після сушки при 150 °С

Важливим моментом є та обставина, що затягування вказаних фрагментів футерівки, що мають у порівнянні з рідкою сталлю більш ніж у 2 рази меншу щільність, канал дозатора (таблиця 1) відбувається внаслідок динамічного впливу на них потоків металу. Відносно ерозії набивної маси, з якої формується лійка розливного вузла, найбільш ймовірною її причиною є використання кисню для відкриття рівчаків. З метою вивчення зношення типових зон футерівки робочого шару проміжного ківша, була використана фізична модель проміжного ківша в різних зонах якої були розміщені експериментальні зразки імітаторів футерівки. Час розливання складав 15 хвилин. Ідентифікація динаміки зношення робочого шару футерівки проміжного ківша, представлена на рисунку 7.

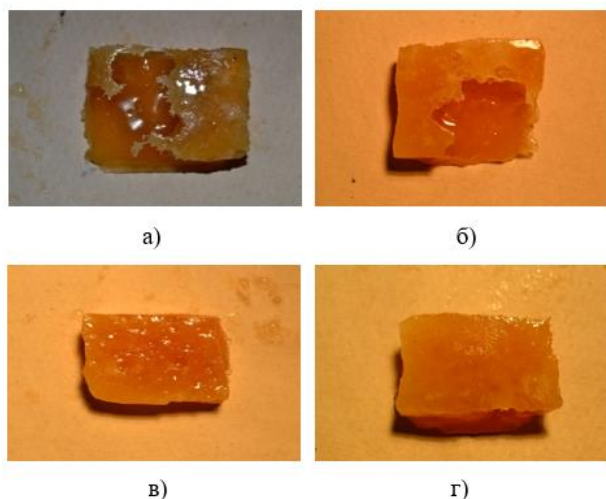


Рисунок 7 - Зразки імітаторів футерівки після 15 хвилин розливання: а), б) розташування біля бічних стінок проміжного ківша; в) на рівні наливу металу; г) між третім та четвертим рівчачками

Отже найбільшого руйнівного впливу зазнали зразки, локалізовані безпосередньо на «бійному» місці, передній стінці дельти і біля крайніх рівчаків.

За допомогою фізичної моделі були проведені дослідження процесу зародження та розвитку вихрової вікнини. З цією метою, в різні точки моделі вводили барвник, що дозволяє спостерігати рух вихрових ниток. Показано, що виникнення вихрової вікнини в проміжному ківші викликає порушення стабільності процесу розливання, що обумовлено можливою зміною діаметра каналу стакан-дозатора, порушенням суцільності струменя (утворення «віяла»), що спричинене

затягуванням шлакових частинок у порожнину стакан-дозатора.

Між тим за даними фізичного моделювання виникнення стійкої вихрової вікнини з утворенням повітряного шнура починається вже за значення напору рідини в проміжному ківші на рівні 230 мм при внутрішньому діаметрі стакан-дозатора 17 мм. У той же час стійка вихрова вікнина без утворення повітряного шнура виникає при рівні наливу в проміжному ківші 300-400 мм.

При перековшуваннях зі збільшенням рівня металу в проміжному ківші стійка вихрова вікнина зберігається до значення напору рідини 450 - 480 мм. Закручування рідини навколо осі стакан-дозатора і затягування частинок покривного шлаку і бульбашок повітря струменем рідини має місце при значенні напору рідини в проміжному ківші на рівні 600-700 мм і існує протягом 7-8 хв.

Встановлено, що обертання рідини в моделі проміжного ківша з підвищенням рівня вище критичного не припинялося і тривало деякий час, причому розвинена вікнина періодично практично повністю зникала і знову з'являлася. Профіль вирви у процесі розвитку цього явища набував чітко витягнутої спіралеподібної форми.

У процесі промислових спостережень було зазначено, що «калібрувальні» вставки нижнього стакан-дозатора, що виготовляються з діоксиду цирконію (ZrO_2) модифікованого гафнієм (Hf) або ітрієм (Y), різних фірм-постачальників мають відмінну один від одного форму заокруглення у верхній частині площини стикування з стаканом-дозатором. Така відмінність обумовлена конфігурацією пресового оснащення виробників для виготовлення «калібрувальних» вставок.

Зважаючи на це, змінним параметром для цього дослідження було ухвалено рішення вибрати конфігурацію внутрішньої порожнини (заокруглення в місці зіткнення стаканів-дозаторів) цирконієвої вставки (рисунок 8). Вибір конфігурації внутрішньої порожнини «калібрувальної» вставки може

розглядатися як ключовий інструментарій для організації щільного струменя металу при його витіканні на ділянці «стакана-дозатор – кристалізатор».

За допомогою програмного забезпечення, була вивчена динаміка витікання

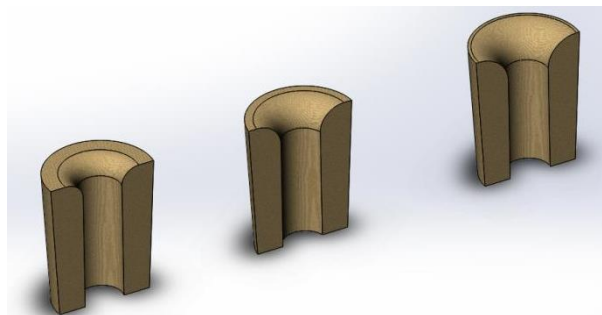
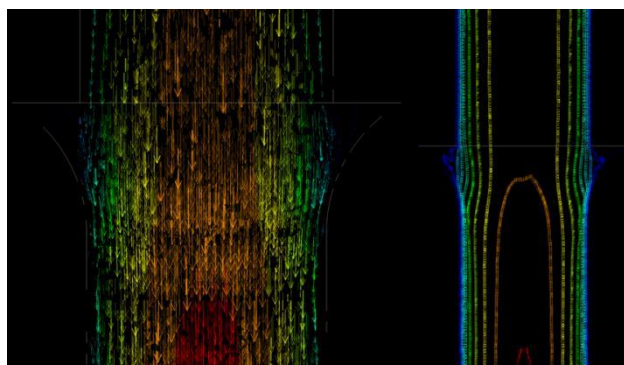


Рисунок 8 - Зовнішній вигляд «калібрувальних» вставок з різними конфігураціями заокруглення («лійки») нижнього стакана-дозатора (зліва на право – заокруглення 1 мм (без заокруглення), заокруглення 6 мм, заокруглення 10 мм)



0 0,70 1,40 2,10 2,80 3,51 4,02 4,50 5,20 5,6

Рисунок 9 - Векторні діаграми швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 18 мм (постійного) та 18 мм (змінного за наявності округлення)

нижньому стакані-дозаторі із заокругленням при розливанні з верхнім стаканом-дозатором діаметром 21 мм є прикладом ефективного використання заокруглення як механізму управління потоками всередині сталерозливного каналу. В даному випадку заокруглення 8 мм забезпечує плавний перехід між діаметрами верхньої та нижньої вставки стакана-дозатора. Завдяки великому радіусу за великої різниці поперечних перерізів каналів виключається можливість утворення застійної зони. Вихрові явища в області площини ковзання також відсутні.

Спираючись на отримані результати, була розроблена формула, що дозволяє підібрати радіус кривизни лійки «калібрувальної» вставки нижнього та

сталі з нижнього та верхнього стакана-дозатора різних діаметрів з заокругленням та без нього. Приклад отриманих векторних діаграм швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 19 мм (постійного) та 18 мм (змінного за наявності заокруглення) зображений на рисунку 9.

Встановлено, що у разі малої відмінності діаметрів вставки верхнього та нижнього стакана-дозатора використання «калібрувальних» вставок без заокруглення є найбільш виправданим внаслідок відсутності застійних зон та кращої турбулентної картини по перерізу сталерозливного каналу.

Наприклад, витік сталі з верхнього стакана-дозатора діаметром 21 мм в нижній стакан-дозатор, що не має заокруглень діаметром 16 мм, носить нестабільний характер. Даний варіант є найбільш небажаним з усіх досліджуваних у зв'язку з тим, що відкладення неметалевих включень відбуватиметься всередині сталерозливного каналу, а не в зоні, утвореною стиком вставки верхнього стакана-дозатора і заокругленням вставки нижнього стакана-дозатора.

Варіант «калібрувальної» вставки в

верхнього стакана-дозатора (Патент №127280), яка дозволить знизити ймовірність закручування струменя металу створюючи застійні явища та осідання продуктів плавки на її внутрішній порожнині, а також забезпечити компактність витікання струменя.

«Калібрувальна» вставка, вхідний отвір якої виконано у вигляді конфузора, що переходить в циліндричний канал, який відрізняється тим, що поверхня конфузора вставки виконана криволінійною, описаною радіусом кривизни, обумовленим наступною залежністю:

$$R_{кр} = \frac{D_{к}}{D_{ц.к.}} \cdot K,$$

де: $R_{кр}$ - радіус кривизни конфузора вставки стакан-дозатора, мм;

$D_{к}$ – зовнішній діаметр конфузора вставки стакан-дозатора, мм;

$D_{ц.к.}$ - діаметр циліндричного каналу вставки стакан-дозатора, мм;

K – коефіцієнт кривизни конфузора вставки, мм,

Коефіцієнт кривизни конфузору «калібрувальної» вставки обумовлений залежністю:

$$K = \frac{H_{к.вс.}}{\pi\sqrt{3}}, (4),$$

де: $H_{к.вс.}$ - висота «калібрувальної» вставки стакан-дозатора, мм.

У таблиці 2 представлені результати розрахунків оптимального радіусу кривизни лійки «калібрувальної» вставки для нижніх стаканів-дозаторів з найбільш поширеними внутрішніми діаметрами.

Таблиця 2 – Результати розрахунку оптимального радіусу кривизни лійки «калібрувальної» вставки для нижньої стакана-дозатора різного діаметра.

R кр., (мм) (радіус кривизни конфузора)	Dц.к. (мм) (діаметр циліндричного каналу)	D до, (мм) (зовнішній діаметр конфузора)	H нд.(const), (мм) (висота цирконової вставки)
20,9	14	29	55
20,2	14,5	29	55
19,5	15	29	55
18,9	15,5	29	55
18,3	16	29	55
17,8	16,5	29	55
17,2	17	29	55
16,7	17,5	29	55
16,3	18	29	55
15,8	18,5	29	55
15,4	19	29	55
15,0	19,5	29	55
14,7	20	29	55

Таким чином, при незначному розбігу діаметрів «калібрувальних» вставок верхнього та нижнього стакан-дозатора на 1-1,5 мм використання заокруглень у нижньому стакані-дозаторі не потрібно, а за його наявності буде мати негативний вплив на компактність витікання струменя через присутність при такій конфігурації «калібрувальної» вставки зон з низкою рухливістю потоку та гіршої турбулентної картини по перерізу сталерозливного каналу.

При розбіжності діаметрів «калібрувальних» вставок верхньої та нижнього стакан-дозатора на 1,5-2,5 мм можливе використання заокруглення нижнього стакану на 4-7 мм щодо строго вертикального стику «калібрувальної» вставки (у досліджуваному випадку 10 мм). Розбіжність діаметрів «калібрувальних» стаканів більш ніж на 2 мм вимагає обов'язкового заокруглення нижнього «калібрувального» стакану.

У четвертому розділі «Розробка елементів і схем футерівки проміжного ківша для зниження «віяла» струменя металу у ході розливання» наведені результати промислових випробувань, які були виконані в умовах ПрАТ «Камет-Сталь».

Запуск серії розливання металу відкритим струменем як правило характеризується незадовільною течією металу внаслідок утворення настилів на внутрішній порожнині стакан-дозатора системи швидкої заміни. Це в свою чергу призводить до наступних негативних наслідків: порушення компактності струменя металу (дефект «віяла») через трансформацію «калібрувального» отвору стакан-дозатора, а також «травмування» внутрішньої порожнини стакан-дозатора внаслідок пропалювання його каналу киснем.

Виконаний у роботі хімічний аналіз відкладень показав, що в них міститься близько 12-15% MgO. Для умов сталеплавильного переділу це слід пов'язувати з відновленням Mg з футерівки проміжного ківша та шлаку з отриманням сталі, що містить Mg на рівні тисячних часток відсотка.

Для зниження затягування стакан-дозатора та прояву дефекту «віяла» струменя на початку розливу серії за рахунок зниження розтріскування торкрет-покриття, яке виготовляється на основі MgO, необхідно на початку розливу серії забезпечити максимально швидке наповнення проміжного ківша до робочого рівня при повністю відкритому шибєрному затворі.

Це зумовлено тим, що через комплекс фізичних властивостей MgO (коефіцієнт термічного розширення, теплопровідність, теплоємність, модуль пружності) вогнетриви на основі MgO при охолодженні схильні до термічного розтріскування. При нагріванні перепад температури, що руйнує, становить залежно від швидкості розливання 410-540 °С, а для природного охолодження повітря він становить всього 70°С.

На момент проведення досліджень було виявлено, що поширеною практикою на МБЛЗ ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є тривале розливання на першій плавці серії зі зниженим рівнем металу в промковші. При цьому вихід на номінальний рівень металу забезпечується тільки наприкінці першої або на початку другої плавки в серії. Такий перебіг процесу розливання призводить до погіршення режиму експлуатації футерівки проміжного ківша, оскільки після розігріву її поверхні до 1100-1200°С і тривалої відсутності контакту з металом

через часткове наповнення промковша створюються умови для остигання її частини, що не контактує з металом і, як наслідок, її розтріскування.

Будучи тугоплавкими продукти розтрісканої торкрет маси при попаданні під струмінь можуть бути захоплені потоками і за певних умов зтягнуті в вузли розливу і далі в металопровідні канали, ставши причиною «віяла». Крім того, в умовах розливу з високою серійністю розтріскування торкрет-покриття через розлив на початку серії на знижених рівнях металу знижує стійкість футерівки оголених від металу ділянок. Також для початку серії характерно зменшення отвору стакан-дозатора (зтягування), обумовлене «приробітком» (зношенням) високоосновного торкрет-покриття.

Грунтуючись на вищевикладених факторах, крім швидкого наповнення промковша для зниження ерозії торкрет-покриття рекомендується в ході підготовки промковша до розливання відразу після нанесення торкрет-покриття проводити його «загладжування», що знижує рихлість поверхневого шару покриття та площу контакту з металом.

Для оцінки впливу потраплянь Mg-сполук з футерівки проміжного ківша на розливання металу на початку розливання серії проводилась спеціальна підготовка проміжного ківша, що полягає в ущільненні та розгладжуванні торкрету шару після його нанесення (рисунок 10).



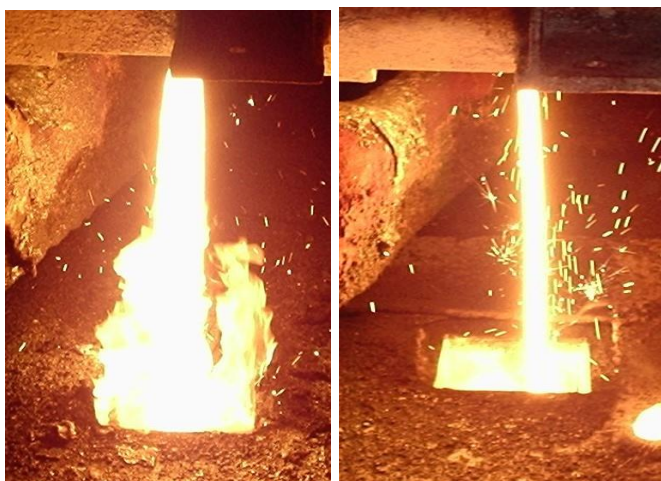
Рисунок 10 – Вид футерівки проміжного ківша після загладжування торкрет шару в зоні сталі

Резюмуючи отримані результати в ході впровадження заходу щодо загладжування торкрет шару проміжного ківша можна затверджувати, що при загладжуванні робочого шару футерівки проміжного ківша відбулося зниження кількості випадків падінь швидкості розливання на початку серії вуглецевого сортаменту з 85% до 50% та низьковуглецевого з 63% до 45%.

Другий етап промислових досліджень був спрямований на розробку «стартових» стаканів-дозаторів на основі NiB₄ для старту розливу серії металу на МБЛЗ з метою зниження відсорткування за поясними дефектами заготовки.

Основною причиною утворення відсорткування по поясах, зокрема за статтею «віяння струменя», є попадання неметалевих включень (часток вогнетривів) до каналу стакан-дозатора, що дозує, і осідання (налипання) їх на стінках ZrO₂ вставці.

Встановлено, що максимальна кількість випадків порушень компактного характеру витікання струменя металу (рисунок 11 А) припадає початок розливання першої плавки в серії, що зумовлено чинником розвитку так званих «стартових віял».



А)

Б)

Рисунок 11 - Порівняння компактності витікання струменя: А)Порушення компактності витікання струменя металу («віяла»), Б) стабільне витікання струменя металу

У ході розливання спостерігається монотонне зниження «віяла», що імовірно обумовлено зниженням ерозії футерівки проковша в міру збільшення спеченого шару футерівки.

На рисунку 12 наведено приклади заростання внутрішньої порожнини нижнього (змінного) стакана-дозатора. Домінуючою причиною такого затягування внутрішньої порожнини є, мабуть, зниження рідкоплинності сталі і утворення відкладень неметалевих включень у каналах стакана-дозаторів (поз. Б).

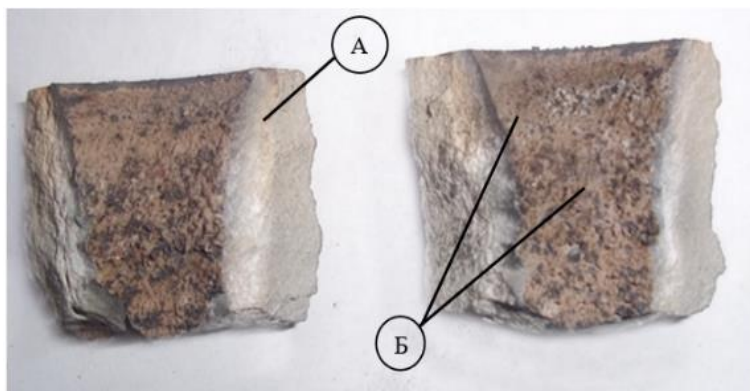


Рисунок 12 – Фрагменти «калібрувальної» цирконієвої вставки стакана-дозатора з відкладеннями неметалевих включень: поз. А – тіло «калібрувальної» вставки; поз. Б - відкладення неметалевих включень

Характерною особливістю неметалевої частини відкладень у порожнині «калібрувальних» вставок є висока пористість матеріалу, яку слід пояснити механізмом поступового налипання неметалевих частинок у процесі розливання. Видається досить очевидним, що рух неметалевих включень в розливному вузлі відбувається стохастично в умовах турбулентного і обертового руху струменя сталі.

За результатами додаткового хімічного аналізу (методика визначення згідно з ДСТУ 30511.5-97, лабораторні ваги електронні АН-50) екзогенних включень встановлено, що в них переважають частинки MgO ($\approx 50-60\%$) і SiO_2 ($\approx 20-25\%$), а також краплі сталі. Це приблизно відповідає співвідношенню цих фаз у торкрет-масах, що використовуються

Встановлено, що відкладення мають досить комірчасту структуру (переважно конгломерати частинок магнезиту розміром 1-30 мкм) з вкрапленням металевих частинок, що представлено на рисунку 13 б (фотографія неметалевої частини відкладень при великому збільшенні).

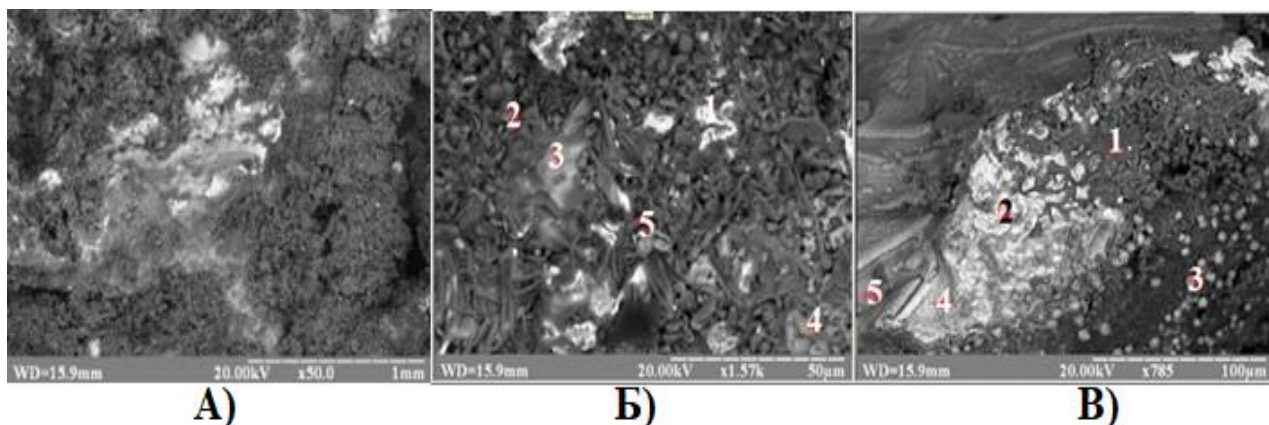


Рисунок 13 – Відібрані неметалеві відкладення (а) - збільшення x50; (б) збільшення x1570; (в) - збільшення x785

Зазначені на рисунку 13 б точки (фрагменти відкладень) №1-№4 переважно складаються з частинок сталі. Зазначений фрагмент №5 містить MgO – 58,7%; Al_2O_3 - 2,5%; SiO_2 – 19,3%, а також вкраплення FeO . Можна припустити, що цей фрагмент є частинками робочого торкрет-покриття або набивної маси, що використовується для формування воронки над верхнім (постійним) стаканом-дозатором у розливному вузлі промковша. Нерідко ці фрагменти мають у своєму складі дрібні краплі сталі сфероїдальної форми.

Виходячи з вищенаведеного, для зниження ймовірності розвитку «стартових віял» доцільно застосовувати на початку розливу серії стакани-дозатори з «калібрувальними» вставками з матеріалу, який не схильний до взаємодії з продуктами плавки. До таких матеріалів можна віднести, наприклад, карбонітрид бору, який має достатньо високу термостійкість і хімічну стійкість.

До таких матеріалів можна віднести карбонітрид бору, який має високу термостійкість і хімічну стійкість. Карбонітрид бору - композиційний матеріал, що складається з вихідних компонентів BN і B_4C , а також «вторинного» нітриду бору з ромбоєдричними кристалічними ґратами, отриманими при азоту-ванні B_4C в процесі реакційного спікання в азоті.

Зовнішній вигляд виготовлених зразків «калібрувальних» вставок для стакана-дозатора виготовлених з карбонітриду бору в порівнянні зі вставками з базового матеріалу ZrO_2 наведено на рисунку 14.

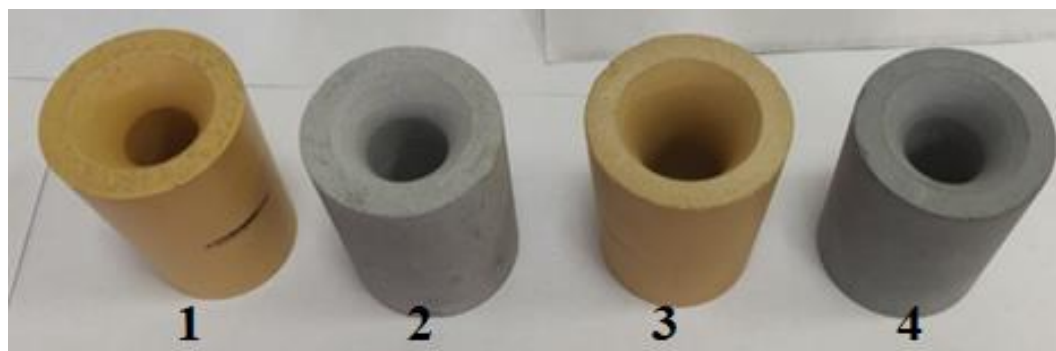


Рисунок 14 - Вигляд виготовлених зразків «калібрувальних» вставок для змінних стаканив-дозаторів з карбонітриду бору (зразки 2,4) порівняно зі вставками з базового матеріалу ZrO_2 (зразки 1,3)

Таблиця 3 Фізико-хімічні параметри виготовлених зразків «калібрувальних» вставок

Склад вихідної шихти, мас %	Температура гарячого пресування, °С	Щільність, г/см ³	Міцність при згинанні, МПа
80BNC-10 SiO ₂ -10 ZrO ₂	1650	2,37	94,2

Так на ПрАТ «Камет-сталь», який має конвертерне виробництво, у складі якого є дві установки ківш-піч та дві високопродуктивні 7-ми рівчаків сортови МБЛЗ, при розливанні рядового сортаменту, у якості стартового змінного стакана-дозатора були встановлені дослідні зразки з «калібрувальною» вставкою з карбонітриду бору. Зовнішній вигляд виробів наведено на рисунку 15.

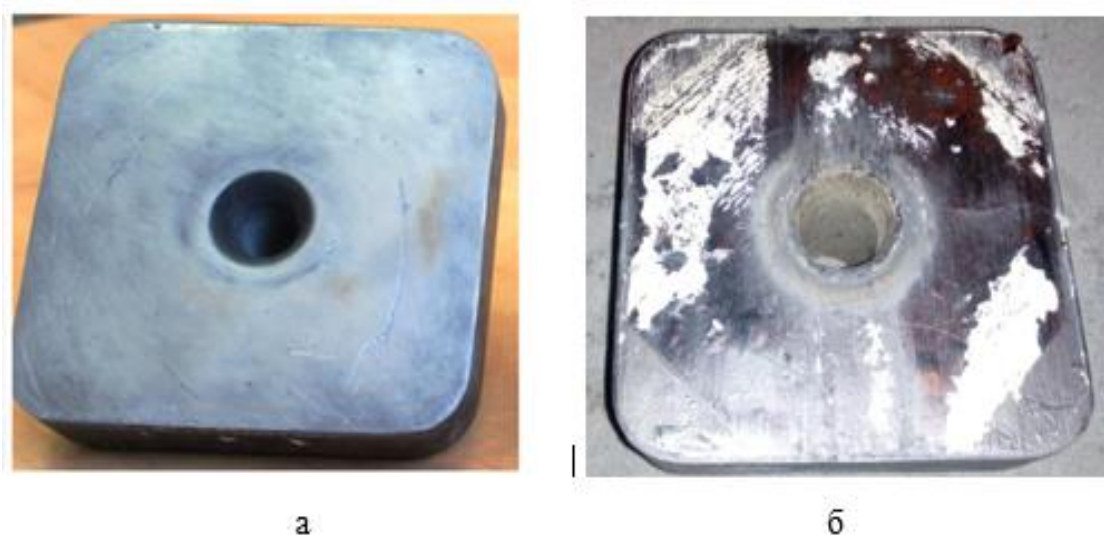


Рисунок 15 - Дослідний зразок стакана-дозатора з експериментальною вставкою з карбонітриду бору (робоча поверхня): а – перед розливанням; б – після розливання металу.

На першій серії розливання металу дослідні дозатори були встановлені на рівчаку № 1 (крайньому) та рівчаках № 3, 4 (середні). На другій серії розливання металу дослідні дозатори були встановлені на рівчаку №1 та рівчаках №3, 5. Тривалість розливання через дослідні стакани-дозатори для першої серії на першому рівчаку склала 21 хвилину, третьому і четвертому рівчаку 24 і 34 хвилини відповідно. При розливанні першої серії на дослідних рівчаках було відзначено стабільне та компактне витікання струменя металу (рисунок 4б). Розливання через дослідні стакани-дозатори було перервано шляхом проведення операції заміни на штатні дозатори з цирконієвою вставкою. При цьому для рівчаків із цирконієвими вставками віяла спостерігалось на двох рівчаках (рівчаки №2, №5).

Розливання через дослідні стакани-дозатори здійснювалися стабільно протягом усього періоду проведення експерименту. Наявність «віяла» та порушень геометрії струменя на експериментальних стаканах-дозаторах не спостерігалось. У той же час при використанні штатного стакана один рівчак із трьох, на яких були встановлені стакани-дозатори з «базовими»

«калібрувальними» вставками, мав сильне «віяла» і був зупинений на початку другої плавки.

Виконані дослідження показали, що застосування стаканів-дозаторів з альтернативним хімічним складом, в першу чергу, дозволяє знизити ймовірність розвитку «стартових віял», що пов'язано з помітним зниженням взаємодії «калібрувальної» вставки стакан-дозатора з продуктами плавки. При цьому більш висока швидкість зносу альтернативних «калібрувальних» вставок і, отже, більш висока швидкість розливання дозволяє забезпечити стабільний старт процесу лиття та швидко вийти на оптимальні швидкісні показники витікання струменя. При цьому розроблені «калібрувальні» стартові вставки мають потенціал у підвищенні експлуатаційних показників за рахунок модифікування їх хімічного складу.

Для зниження "віяла" струменя через потрапляння турбулентних вихрових структур з об'єму промковша в металопровідні канали дозаторів у розливні вузли промковша встановлюють пускові (стартові) воронки, які виготовляються на основі Al_2O_3 . Пускова воронка безпосередньо стикується з розливною лійкою проміжного ківша, формуючи тим самим подовжений металопровідний канал. Схема розташування пускових воронок у проміжному ківші ПрАТ «Камет-Сталь» наведено на рисунку 16.

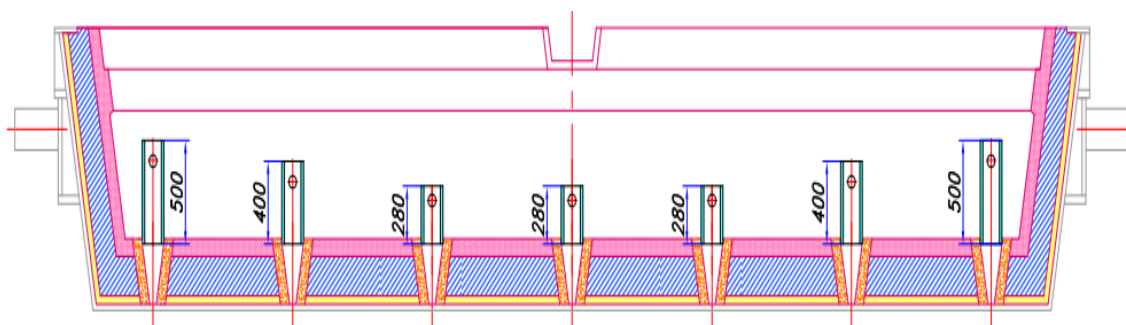


Рисунок 16 – схема розташування пускових воронок у проміжному ківші ПрАТ «Камет-Сталь»

Перевагою таких пускових воронок перед стаціонарними, які встановлюються безпосередньо на верхній стакан-дозатор є те, що для експлуатації нестационарної воронки не потрібна уніфікації «калібрувальної» вставки верхнього стакан-дозатора для щільного та надійного стикування з воронкою, та виключає обов'язкове опрацювання та погодження з постачальником з урахуванням вимог щодо гарантійних обов'язків під час монтажу вогнетривів

Крім того, важливою перевагою схеми футерівки промковша з використанням пускових воронок є автовідкриття ривчаків без використання стартових засипок та кисню для пропалювання каналів дозаторів (за винятком резервних ривчаків). Старт ривчаків без пропалювання дозаторів киснем знижує ймовірність «віяла» через пошкодження каналу дозатора.

Із застосуванням у проміжному ківші пускових воронок було відстежено 4 серії розливання металу. Початок появи металу над поворотним жолобом на ривчаків №1 та 7 відбувався при наповненні до маси 8-11 т, а на ривчаків № 2,

3,5 та 6 при наповненні до маси 4,5-5,5 т та на рівчаку № 4 при наповненні до маси 3,2-3,9 т.

На рисунку 17 наведено проміжний ківш із встановленими експериментальними пусковими воронками виробництва компанії ТОВ «Гір-Інжиніринг» (Україна).



Рисунок 17 – Проміжний ківш із встановленими експериментальними пусковими воронками компанії ТОВ «Гір-Інжиніринг».

Виконання точок входу металу в металопрвідні канали віддаленими на деякій відстані над рівнем дна, забезпечують «фільтрацію» вихрових структур при перетіканні металу з об'єму промковшу на старті серії, де вони генеруються, в канали дозаторів і виключають попадання неметалевих включень. З метою виключення негативного фактору, пов'язаного із застосуванням стаціонарних воронок, було запропоновано застосування пускових (стартових) воронок, що руйнуються, зі стійкістю не менше 10 хвилин, але не більше однієї плавки.

Отже, запропонована схема футерівки промковша з використанням пускових воронок у розливних вузлах є ефективним технологічним рішенням, спрямованим на гідродинамічну стабілізацію розливання на старті серії та зниження кількості «віяла» не тільки через затягування вихрових структур різного масштабу з ванни металу промковшу в канал дозатора, а й через потрапляння в канали дозаторів продуктів руйнування футерівки промковша, а також різних технологічних частинок. Старт рівчаків без пропалювання дозаторів киснем знижує також імовірність проривів під час запуску рівчака і розвитку "віяла" через порушення геометрії каналів дозаторів.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-технічне завдання щодо вдосконалення процесу безперервного розливання сталі на сучасних високошвидкісних сортових МБЛЗ, яке забезпечує підвищення стабільності лиття та поліпшення якості безперервнолитої заготовки в порівнянні з традиційними технологіями за рахунок зниження утворення «віяла» струменя металу, а також на основі розвитку теоретичних уявлень і отриманих експериментальних даних про закономірності явища порушення компактності витікання струменя металу типу «віяла».

Основні наукові та теоретичні результати роботи:

1. Досліджено основні причини і закономірності прояву порушення витікання струменя металу (дефект «віяло») в процесі розливання серії на багаторівчачкових сортових МБЛЗ. В результаті дослідження було встановлено, що основними причинами «віял», є попадання в канал дозатора продуктів

руйнування футерівки промковша (торкрет-покриття і набивної маси, що формує воронки розливних вузлів), фрагментів від руйнування ZrO_2 -вставки верхнього дозатора (з виступаючої з тіла дозатора частиною) і перенесення турбулентних вихрових структур різного масштабу до канал дозатора в тому числі захоплення частинок шлаку з поверхні розплаву с подальшим їх перенесенням у порожнину стакан-дозатора і можливістю осідання цих частинок у «калібровочній» вставці стакан-дозатора.

2. В результаті дослідження в реальних промислових умовах різних технологічних факторів визначено найбільш значущі фактори впливу на «віяла» струменя. До них відносяться швидкість та серійність розливання. Розподіл кількості «віял» по серії має монотонно спадний характер, що обумовлено збільшенням товщини спеченого шару футерування і, відповідно зниженням ймовірності «віяла» через її ерозію. Частотний розподіл «віял» по рівчачах показує, що мінімум «віялових явищ» посідає середні рівчачаки Р2,6, а максимум – на центральні рівчачаки Р3,4,5 що пов'язані з різницею в інтенсивності вимушених потоків.

Частотний розподіл «віял» від часу з моменту відкриття стальковша показує максимальну частоту «віяла» струменя (40% випадків) у перші 10 хв. після його відкриття, що також корелює з позначеною роллю гідродинаміки в аналізованому явищі і обумовлено максимальною інтенсивністю потоків при відновленні зниженого рівня металу в промковші «повним струменем» зі стальковша з максимальною витратою. У період 20-40 хв. «віяла» пов'язані з турбулентністю, обумовленою вимірами температури та відбором проб металу. Деяке зниження частоти «віяла» в період (31-40) хв. обумовлено зменшенням лінійної швидкості струменя зі стальковша і, імовірно, зниженням температури і, як наслідок, рідкоплинність металу. Фактор марочного сортаменту та конструкції промковша не впливає на «віяла» струменя

Період запуску серії розливу металу на сортової МБЛЗ відкритим струменем (з 1 по 6 плавку), особливо середньовуглецевого сортаменту, характеризується незадовільною течією металу внаслідок утворення настилів на внутрішній порожнині стакан-дозатора, що в свою чергу призводить до зниження швидкості витікання металу з стакан-дозатора через зменшення «калібрувального» діаметра внаслідок його заростання, а також порушення компактності струменя металу (дефект «віяла») через трансформацію «калібрувального» отвору стакан-дозатора, а також травмування внутрішньої порожнини стакан-дозатора внаслідок пропалювання його каналу киснем.

3. В результаті дослідження утворення вікнин в багаторівчачовому проміжному ківша було встановлено, що при перековшуванні зі збільшенням рівня металу в проміжному ківші стійка вихрова вікнина зберігається до значення напору рідини на рівні 450 - 480 мм при внутрішньому діаметрі стакан-дозатора 17 мм. Закручування рідини навколо осі стакан-дозатора і затягування частинок покривного шлаку і пухирців повітря струменем рідини має місце при значенні напору рідини в проміжному ківші 600-700 мм і існує протягом 7-8 хвилин. Між тим, ці значення напору сталі співставні з висотою наливу металу в проміжному ківші при стійкій роботі МБЛЗ. Подібні процеси

імовірно і є причиною попадання частинок покривного шлаку в порожнину стакан-дозатора.

4. Досліджено характер заростання стаканів-дозаторів, що супроводжується порушенням компактності витікання струменя металу при використанні вогнетривких компонентів футерівки і пристроїв проміжного ківша. Встановлено, що відкладення мають досить комірчасту структуру (переважно конгломерати частинок магнезиту розміром 1-30 мкм) з вкрапленням металевих частинок. Фрагменти відкладень переважно складаються з частинок сталі. Можна припустити, що ці фрагменти є частинками робочого торкрет-покриття або набивної маси, що використовується для формування воронки над верхнім (постійним) стаканом-дозатором у розливному вузлі промковша. За результатами додаткового хімічного аналізу (методика визначення згідно з ДСТУ 30511.5-97, лабораторні ваги електронні АН-50) екзогенних включень встановлено, що в них переважають частинки MgO ($\approx 50-60\%$) і SiO_2 ($\approx 20-25\%$), а також краплі сталі. Це приблизно відповідає співвідношенню цих фаз у торкрет-масах, що використовуються.

5. Характерною особливістю неметалевої частини відкладень у порожнині «калібрувальних» вставок є висока пористість матеріалу, яку слід пояснити механізмом поступового налипання неметалевих частинок у процесі розливання. Видається досить очевидним, що рух неметалевих включень в розливному вузлі відбувається стохастично в умовах турбулентного і обертального руху струменя сталі.

6. Одержали свій подальший розвиток уявлення про комплексний підхід до мінімізації ефекту розбрикування металу чи його повного усунення за рахунок впровадження низки технічних рішень на ділянці «проміжний ківш – кристалізатор» сортової МБЛЗ. Для зниження ефекту заростання порожнини стакан-дозатора доцільно оптимізувати його конструкцію, узгоджуючи швидкість розливання (витрата металу), а також висоту наливу металу у промковші.

З метою мінімізації ймовірності осідання на внутрішній порожнині «калібрувальної» вставки нижнього стакан-дозатора продуктів плавки, а також для забезпечення компактності струменя металу, що розливається, була розроблена формула розрахунку оптимального радіусу кривизни лійки «калібрувальної» вставки для нижніх стаканів-дозаторів, які найбільш часто використовуються на підприємствах металургійної галузі.

7. Ефективним засобом усунення явища стартового «віяла» є розроблені, виготовлені та опробувані «калібрувальні» вставки для нижніх стаканів-дозаторів із композиційного матеріалу, що складається з вихідних компонентів VN і V_4C , а також «вторинного» нітриду бору з ромбічною кристалічною решіткою, отриманою при азотуванні V_4C в процесі реакційного спікання в азоті.

8. З'ясовано, що для зниження ефекту «віяла» струменя з промковшу за рахунок зменшення розтріскування торкрет-покриття на основі MgO необхідно на початку розливання серії забезпечити максимально швидке наповнення промковшу до робочого рівня при повністю відкритому шиберному затворі. Тривале розливання на першій плавці серії зі зниженим рівнем металу в

промковші, що зустрічається в практиці багатьох МБЛЗ, призводить до розтріскування торкрет-покриття, «віяла» струменя та зниження стійкості футерівки в зоні шлакового поясу.

9. Запропонована схема футерівки промковша з використанням розроблених стартових (пускових) воронки у розливних вузлах є ефективним технологічним рішенням, спрямованим на зниження кількості «віяла» не тільки через затягування вихрових структур різного масштабу з ванни металу промковша в канал дозатора, але й через попадання в канали дозаторів продуктів руйнування футерівки промковша та цирконової вставки верхніх дозаторів. Річний очікуваний економічний ефект складає більш ніж 3185178, 9 грн / рік.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз:

1. A.N. Smirnov. Rotary Furnace for Comparative Evaluation of Heating Unit Refractory Object Erosion Resistance / Smirnov, A.N., Nemsadze, G.G., Sharandin, K.N., Ryabyi, D.V., Lizun, A.Y. // *Refractories and Industrial Ceramic* this link is disabled. – July 2018, pp. 227–230;. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11148-018-0211-7/>

Статті в наукових фахових виданнях:

2. Пісарський С. М. Оцінка технологічних можливостей стабілізації швидкості розливання відкритим струменем на сучасній сортовій машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Повідомлення 1 / С. М. Пісарський, Д. О. Лавренко, О. М. Смірнов, Д. В. Рябий // *Метал та лиття України*. — 2018. — № 3-4. — С. 28-33. <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/166505>

3. Пісарський С. М. Оцінка гідродинамічних факторів підвищення ефективності розливання сталі на багатоструменевих сортових МБЛЗ./ С. М. Пісарський, А. М. Смірнов, Д. В. Рябий. // *Процеси лиття*. — 2018. — № 5. — С. 19-29. <https://www.plit-periodical.org.ua/index.php/plit/article/view/164>

4. Пісарський С. М. Оцінка технологічних можливостей стабілізації швидкості розливання відкритим струменем на сучасній сортовій машині безперервного лиття заготовок (МБЛЗ). Повідомлення 2 / С. М. Пісарський Д. О. Лавренко, О. М. Смірнов, Д. В. Рябий. // *Метал та лиття України*. — 2018. — № 5-6. — С. 3-9. <http://dspace.nbuu.gov.ua/handle/123456789/166530>

5. Смірнов А.М. Особливості виникнення стартових віял при безперервному розливанні сортової заготовки відкритим струменем / А.М. Смірнов, Д. В. Рябий, О. П. Верзілов // *Процеси лиття*. — 2019. — №1. — С.23 -30;. <https://www.plit-periodical.org.ua/index.php/plit/article/view/149>

6. Смирнов А.Н. Универсальные фильтрующие системы как эффективный способ повышения качества металлопродукции / А.Н. Смирнов, Г. Г. Немсадзе, Р. А. Джоджуа, К. Н. Шарандин, Д. В. Рябий // *Met. lit'e Ukr.*, vol.27, 2019, № 10-12 (317-319) <https://www.metalsandcasting.com/index.php/mcu/article/view/186/187>

7. Смірнов О.М. Деякі особливості розливання сортової заготовки відкритим та закритим струменем/ О.М. Смірнов, В. Є. Ухін, С. В. Семірягін, А.Ю. Семенко, В.В. Осипенко, Ю.О. Смірнов, Ю.П. Скоробагатько, Д. В. Рябий

// Met. lit'e Ukr., vol.31, 2023, № 12 (31-41). DOI:
<https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02>

Патенти України:

8. Патент №127280 (Україна). Пристрій швидкої заміни стаканів для безперервного розливання розплаву металу на машинах безперервного лиття заготовок відкритим струменем /О.М. Смирнов, Г. Г Немсадзе, Р.А Джоджуа, К. М. Шарандін, Д.В. Рябий – Опубл. 05.07.2023, бюл. № 27/2023;
<https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1746632/>

Матеріали наукових конференцій і статті в науково-технічних журналах:

9. G.G.Nemsadze. Features of the occurrence of starting fans in the continuous casting of billets by open jet / G.G.Nemsadze, K.N. Sharandin, A.N.Smirnov, R.A. Dzhodzua, D.V. Ryaby // 63rd International Colloquium on Refractories 2020 – «Refractories enabling High Temperature Technologies» – September 16th and 17th, 2020, pp 172-175.; <https://cerameunie.eu/topics/cerame-unie-sectors/sectors/63rd-icr-international-colloquium-on-refractories/>

10. Немсадзе Г.Г. Универсальные фильтрующие системы как эффективный способ повышения качества металлопродукции / А Г. Г. Немсадзе, Р. А. Джоджуа, А. Н. Смирнов, К. Н. Шарандин, Д. В. Рябий // Тезисы докладов «Международной конференции огнеупорщиков и металлургов». По материалам «Международной конференции огнеупорщиков и металлургов». – Москва, 2018. – С.69-708; <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/972/886>

11. Немсадзе Г.Г. Современные огнеупоры для быстрой смены стаканов-дозаторов производства компании GIR-ENGINEERING / А Г. Г. Немсадзе, Р. А. Джоджуа, А. Н. Смирнов, Д.В. Рябий, К. Н. Шарандин, // Новые огнеупоры. – 2019. – №3. – С.12-16;. <https://newogneup.elpub.ru/jour/article/view/1167/1027>

АНОТАЦІЯ

Рябий Д.В. «Стабілізація витікання струменю металу сортової МБЛЗ за рахунок удосконалення умов роботи стакана-дозатора». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів». «Інститут промислових та бізнес технологій» Українського державного університету науки і технологій, м. Дніпро, 2024.

Дисертаційна робота присвячена вивченню процесів витікання металу на етапі другого технологічного переливання сталі на МБЛЗ між проміжним ківшем і кристалізатором через порожнину стаканів-дозаторів, зменшенню розбризування струменю металу та зменшенню хвилеутворення на меніску кристалізатора, за рахунок чого можливо досягти підвищення експлуатаційного та технологічного ресурсу стаканів-дозаторів системи швидкої зміни («ШЗД»).

Дослідницьким шляхом на протязі моніторингу виробничого процесу були встановлені закономірності утворення дефекту витікання металу на ділянці «проміжний ківш – кристалізатор сортової МБЛЗ» типу «віяло».

Отримані дані по частотному розподілу розбризуванні по рівчаках, є підтвердженням передбачуваного механізму впливу гідродинамічних потоків і

рівня турбулентності на прояви «віяла» в ході розливання на рівчаках, де інтенсивність циркуляційних потоків від струменя, що витікає із сталерозливного ківша максимальна, частота випадків «віяла» металу також максимальна. Мінімум проявів «віялових» явищ припадає на середні рівчаки.

Частотний розподіл «віял» залежно від часу з моменту відкриття шибєрного затвора сталерозливного ківша показує максимальну частоту «віяла» струменя (40% випадків) в перші 10 хв. після його відкриття, що також пов'язано з роллю гідродинаміки потоків у розглянутому явищі і обумовлено максимальною інтенсивністю потоків при відновленні зниженого рівня металу в проміжному ківші «повним струменем» зі сталерозливного ківша з максимальною витратою. У період 20-40 хв. «віяла» пов'язані турбулентністю, обумовленою вимірами температури та відбором проб металу. Деяке зниження частоти «віяла» у період (31-40) хв. обумовлено зниженням температури і, як наслідок, рідкоплинність розплаву.

Встановлено, що великий вплив на утворення «стартових віял», характерних для перших плавок у серії, мають екзогенні неметалеві вкраплення, що спостерігаються в каналах дозаторів, які мають вигляд відносно пухких, частково заметалених фрагментів футерівки, що відшаровуються нерідко зі сфероподібними виділеннями крапель металу.

Важливим моментом є та обставина, що затягування вказаних фрагментів футерівки, що мають у порівнянні з рідкою сталлю більш ніж у 2 рази меншу щільність, в канал дозатора відбувається внаслідок динамічного впливу на них потоків металу.

Ключові слова: сталь, машина безперервного лиття заготовок, стакан-дозатор, «калібрувальна» вставка, кристалізатор, сортова заготовка, проміжний ківш, «віяла» струменя, ZrO_2 , розбризкування, розливний вузол, вихрова вікнина.

ABSTRACT

Riabyi D.V. Stabilization of the outflow of a metal stream in the area between the tundish and the crystallizer and reducing its splashing by improving the operating conditions of the dosing nozzle. - Manuscript.

The thesis for the degree of Doctor of Philosophy (Ph.D.) by specialty 05.16.02 - "Metallurgy of ferrous and non-ferrous metals and special alloys. Institute of industrial and business technologies Ukrainian state university of science and technologies, Dnipro, 2024.

The dissertation work is devoted to the study of metal outflow processes at the stage of the second technological transfer of steel at the CCM between the tundish and the crystallizer through the cavity of the quick change nozzle, reducing the splashing of the metal jet and reducing wave formation on the meniscus of the crystallizer, due to which it is possible to achieve increased operation.

The main content of the dissertation work.

Through research, during the monitoring of the production process, patterns of formation of a defect in the outflow of metal in the section "tundish - crystallizer of Billet casters.

The obtained data on the frequency distribution of splashing (“fan”) along streams confirms the previously assumed mechanism of the influence of hydrodynamic flows and the level of turbulence on the manifestations of the “fan” during a spill - on central streams No. 3-No. 5, where the intensity of jet-circulation flows varies from the flowing (falling) jet from the steel-pouring ladle is maximum, the frequency of cases of metal “fan” is also maximum. The minimum manifestations of “winnowing” phenomena occur in medium-sized streams No. 3-5. A slight increase in the frequency of “fans” along the outer streams No. 1,7 is explained by additional swirling and non-symmetry of the flows near the ends of the tundish.

Statistical analysis of various factors, incl. technologically, the most significant factors influencing the “fan” of the jet have been identified. These include speed and serial casting. The distribution of “fans” across the series has a monotonically descending character, which is associated with the role of the tundish lining and is caused by an increase in the thickness of the sintered layer of the lining and, accordingly, a decrease in the probability of “fans” due to its thermomechanical erosion. The frequency distribution of “fans” depending on the stream number shows that the minimum splashing occurs in the middle streams №2,6, and the maximum – in the central streams №3,4,5 which is due to the difference in the intensity of forced flows.

The frequency distribution of the “fan” depending on the time from the moment of opening the gate valve of the steel-pouring ladle shows the maximum frequency of the “fan” of the jet (40% of cases) in the first 10 minutes. after its discovery, which is also related to the role of flow hydrodynamics in the phenomenon under consideration and is due to the maximum intensity of flows when the reduced level of metal in the tundish is restored with a “full jet” from the steel-pouring ladle with maximum flow rate. In the period of 20-40 min. The “fans” are connected by turbulence caused by temperature measurements and metal sampling. A slight decrease in the frequency of “fans” in the period (31-40) min. due to a decrease in temperature and, as a consequence, fluid mobility of the melt. The factor of brand assortment and tundish design does not have a noticeable effect on the “fans” of the jet.

It was found that the formation of “starting fans”, characteristic of the first heats in a series, is greatly influenced by exogenous non-metallic inclusions observed in the dispenser channels, which have the appearance of relatively loose, partially swept, peeling fragments of the lining (shotcrete or ramming mass). bottling unit), often with sphere-like metal deposits. These metal deposits are typical of non-metallic deposits deposited on the walls of dispensers during tightening.

An important point is the fact that the tightening of these lining fragments, which have more than 2 times lower density compared to liquid steel, into the dispenser channel occurs due to the dynamic effect of metal flows on them.

Keywords: steel, continuous casting machine, dosing nozzle, quick change nozzle, calibration insert, crystallizer, billet, tundish, jet fans, ZrO_2 , splashing, pouring unit, vortex window.