

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

РЯБИЙ ДМИТРО ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 669.01.53:621.74.047


ДИСЕРТАЦІЯ

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

05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»
13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

 Рябий Д.В.
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник: Смірнов Олексій Миколайович, д.т.н, проф.

Дніпро 2024

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 швидкозмінних стаканів-дозаторів, зменшенню розбризкування струменю металу та зменшенню хвилеутворення на меніску кристалізатора, за рахунок чого можливо досягти підвищення експлуатаційного технологічного ресурсу.

Основний зміст дисертаційної роботи.

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

Статистичний аналізу різних факторів, у т.ч. технологічних, визначено найбільш значущі фактори впливу на «віяловість» струменя. До них відносяться швидкість та серійність розливання. Розподіл «віял» по серії має монотонно спадаючий характер, що пов'язано з роллю футерування проміжного ківша і обумовлено збільшенням товщини спеченого шару футерування і, відповідно зниженням ймовірності «віяла» через її термомеханічну ерозію.

Частотний розподіл «віял» залежно від часу з моменту відкриття шиберного 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 ковші «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 «віял» у період (31-40) хв. обумовлено зниженням температури і, як наслідок, рідкоплинність розплаву. Фактор марочного сортаменту і конструкції проміжного ківша не надає помітного впливу на «віяла» струменя.

Отримані дані по розподілу розбризування («віяло») по рівчаках, є підтвердженням раніше передбачуваного механізму впливу гідродинамічних потоків і рівня турбулентності на прояви «віяла» в ході розливу - на центральних рівчаках №3-№5, де інтенсивність струменево-циркуляційних потоків від струменя, що витікає (падаючого), із сталерозливного ківша максимальна, частота випадків «віяла» металу також максимальна. Мінімум проявів «віяльних» явищ припадає на середні рівчаки №2, №6. Деяке підвищення частоти «віял» по крайніх рівчаках №1,7 пояснюється додатковою закруткою і не симетрією потоків поблизу торців проміжного ківша.

Було встановлено, що великий вплив на утворення «стартових віял», характерних для перших плавок у серії, мають екзогенні неметалеві включення, що спостерігаються в каналах дозаторів, які мають вигляд відносно пухких, частково заметалених фрагментів футерівки, що відшаровуються (торкрет або набивної маси з розливного вузла), нерідко зі сфероподобними виділеннями металу. Зазначені виділення металу є типовими для відкладень неметалевих включень на стінках дозаторів при затягуванні.

Важливим моментом є та обставина, що затягування вказаних фрагментів футерування, 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 , розбризування, розливний вузол, вихрова вікнина.

ABSTRAC

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 high-quality CCM of the fan type were established.

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 №2,5, and the maximum – in the central streams №3,4, 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.

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 Ceramicsthis 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.nbu.gov.ua/handle/123456789/166505>

3. Писарський С. М. Оцінка гідродинамічних факторів підвищення ефективності розливання сталі на багатоструменевих сортових МБЛЗ./ С. М. Писарський, 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.nbu.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. Смірнов, 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>

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ.....	2
ВСТУП.....	11
РОЗДІЛ 1.....	18
АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СОРТОВОЇ ЗАГОТІВЛІ ТА ТЕНДЕНЦІЙ ЇХ РОЗВИТКУ.....	18
1.1 Сучасні технологічні цехи з МБЛЗ для виробництва сортової заготовки в Україні.....	22
1.2 Аналіз прогресивних технологічних схем розливання сортової заготовки на високошвидкісних МБЛЗ та оцінка основних показників її якості.....	24
1.3 Аналіз технологічних схем дозування металу при розливанні сортової заготовки, оптимізації схеми підведення металу в кристалізатор (доцільність оптимізації вибору вогнетривких матеріалів, що витрачаються, для розливання).....	32
Висновки по першому розділу.....	42
РОЗДІЛ 2.....	44
ОСНОВНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИКИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	44
2.1 Розробка фізичної моделі та методики моделювання витікання сталі на ділянці стакан-дозатор-кристалізатор	44
2.2 Дослідження утворення вікнино-подібних явищ при переливанні металу з проміжного кваш в кристалізатор у процесі безперервного розливання сталі.....	51
2.3 Дослідження зношення футерівки проміжного ківша, що призводить до заростання сталерозливного каналу стакана- дозатора.....	54
2.4 Розробка математичної моделі витікання металу на ділянці верхній (постійний)- нижній (змінний) стакан-дозатор.....	58

Висновки по другому розділу.....	68
РОЗДІЛ 3.....	70
ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПОВЕДІНКИ РОЗПЛАВУ ПІД ЧАС ВИСОКОШВИДКІСНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ НА БАГАТОРІВЧАКОВИХ МБЛЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШВИДКОЗМІННИХ СТАКАНІВ-ДОЗАТОРІВ	70
3.1 Вивчення природи виникнення «віяла» металу в процесі високошвидкісного безперервного розливання сталі на багаторівчачкових МБЛЗ	70
3.2 Дослідження характеру руйнування типових зон зносу футерівки проміжного ківша внаслідок руху циркуляційних потоків, що сприяють заростанню стакан-дозатора неметалевими включеннями	80
3.3 Дослідження утворення вікнино-подібних явищ при переливанні металу з проміжного ківша в кристалізатор у процесі безперервного розливанні сталі	91
3.4 Дослідження витікання металу на ділянці верхній (постійний)- нижній (змінний) стакан-дозатор, а також розробка та визначення оптимальної конфігурації калібрувальної вставки з метою мінімізації «віялоподібних явищ».....	100
Висновки по третьому розділу.....	111
РОЗДІЛ 4.....	113
РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ І СХЕМ ФУТЕРУВАННЯ ПРОМІЖНОГО КІВША ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ «ВІЯЛА» СТРУМЕНЯ МЕТАЛУ У ХОДІ РОЗЛИВАННЯ	113
4.1 Загладжування робочого шару футерування проміжного ківша з метою зменшення виникнення «стартових віял» на початку розливання серії металу на МБЛЗ	113

4.2 Розробка «стартових» стаканів-дозаторів на основі NBC для старту розливу серії металу на МБЛЗ з метою зниження відсортуння за поясними дефектами заготовки	118
4.3 Дослідження характеру зносу гільзи кристалізатора високошвидкісної сортової МБЛЗ у процесі розливання відкритим струменем.....	127
4.4 Використання пускових воронки для зниження турбулентних вихрових структур на старті розливання серії металу на МБЛЗ.....	140
4.5 Розрахунок очікуваного економічного ефекту від зниження «віял» за рахунок впроваджених заходів	146
Висновки по четвертому розділу.....	152
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	159
ДОДАТОК А	176

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку технологій і обладнання для розливання сталі велика увага приділяється отриманню заготовки, геометричний перетин якої найбільшою мірою наближається до перетину металопродукції (з урахуванням необхідної деформації). Стосовно отримання довгомірного прокату особливого значення набуває безперервне розливання на сортову заготовку в умовах високопродуктивних цехів відкритим струменем.

Актуальність теми. Сучасні технології безперервного розливання припускають підвищення питомої продуктивності, яка досягається за рахунок налагодженого тимчасового циклу на ланцюгу «плавильний агрегат-установка позапічної обробки сталі - МБЛЗ». Крім того, додатковий резерв підвищення продуктивності МБЛЗ забезпечується високою стійкістю вузлів вогнетривкої футерівки проміжного ківша і розливних вузлів (40-60 плавок і більше).

При цьому передчасний вихід з ладу одного з важливих елементів футерування проміжного ківша (наприклад, верхній стакан-дозатор), призведе до втрати рівчака, зменшення швидкості розливання і як наслідок зниження продуктивності і збільшення питомої витрати на тонну готової продукції. Також варто відзначити, що передчасний вихід з експлуатації або позаштатна робота стакана-дозатора може призвести до розвитку аварійної ситуації або порушення компактності витікання струменя металу на ділянці «верхній стакан-дозатор - кристалізатор», її «віяла» та відхилення струменя від вертикалі. Останні позаштатні режими роботи відіграють ключову роль в утворенні поверхневих дефектів заготовки, що розливається, і кардинально знижують продуктивність МБЛЗ.

Сучасні високопродуктивні сортови МБЛЗ, мають, як правило, у своєму складі 5-7 рівчаків. Тим часом більшість сталеплавильних цехів обладнані сортами МБЛЗ, які розроблені 10-12 років тому і більше. Це зумовлює модернізацію таких МБЛЗ в умовах діючого виробництва та обмежень, які

закладені в конструкції конкретної машини.

В останнє десятиріччя 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. У разі вітчизняних цехів підвищення ефективності виробництва традиційних сортових МБЛЗ переважно вже досягли своїх технологічних меж. 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 [1, 2].

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 заготовлі на багаторівчачкових МБЛЗ з підвищеною продуктивністю є актуальним завданням, вирішення якого забезпечить суттєвий енерго- та ресурсозберігаючий ефект в умовах нарощування виробництва та зниження питомих витрат.

Мета та завдання дослідження. Встановити раціональні параметри безперервного розливання сталі на багаторівчачковій сортової МБЛЗ при литті відкритим струменем довгими серіями на підвищених швидкостях, що забезпечить зниження питомих витрат вогнетривів і знизить відсорткування безперервнолитої 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 в наслідок 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 багаторівчачових 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 багаторівчачовому 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 багаторівчачовій 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 стали відкритим струменем на сортових машинах з використанням системи швидкої зміни стаканів-дозаторів. Встановлено, що незадовільне розливання металу та заміна стакана-дозатора на інший, виникає в наслідок 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 стали відкритим струменем на багаторівчачковій 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 заокруглення лійки. Це дозволить знизити ймовірність заростання каналу нижнього стакану-дозатора неметалевими включеннями вогнетривкого походження. Однак у ході розливу серії

збільшення діаметра калібрувальної вставки верхнього стакан-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 стакан-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. Розроблена формула наведена нижче:

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

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:

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

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

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

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

Запропонована нова схема футерування проміжного ківша з використанням розроблених стартових (пускових) воронок у розливних вузлах, що 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 дозаторів, 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 через швидкозмінні стакани-дозатори при розливанні сталі на багаторівчаківій 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 в металургійній галузі.

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 розбризування металу при його витіканні із змінного стакана-дозатора при розливанні сталі відкритим струменем на високопродуктивних МБЛЗ. На підставі цього, здобувачем було розроблено, та впроваджена низка технологічних і конструктивних заходів, які за принципом комплексного підходу зменшити до 30 % прояв дефекту витікання струменя типу «віяла».

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, 19-20 квітня 2018 р. м. Москва, XVII міжнародній конференції «вогнетривників і металургів», 16-17 травня 2019 р. м. Москва, на 63-й Міжнародному колоквиуму з вогнетривів «Refractories enabling High Temperature Technologies», 16-17 вересня 2020 р. м. Аахен (Німеччина).

Структура дисертації. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів з висновками по кожному розділу, загальних висновків, переліку використаних джерел (148 найменувань) та додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає – 176 сторінки, і містить: 67 рисунків, 28 таблиць, 1 додаток.

1. СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ БЕЗПЕРЕРВНОГО РОЗЛИВАННЯ СОРТОВОЇ ЗАГОТОВКИ І ТЕНДЕНЦІЇ ЇХ РОЗВИТКУ

Протягом останнього десятиріччя підприємства металургійного комплексу України та інших країн східної Європи впевнено утримують позиції одних з найбільших постачальників сортової заготовки та довгомірного прокату на світовий ринок металопродукції. Динаміка розвитку характеризується помітним посиленням конкуренції у зв'язку з підвищенням вимог, що висуваються до якості продукції, яка виробляється. Також стрімкого зростання виробничих потужностей у КНР, Індії, В'єтнамі. Свою частку в цей процес внесли і металургійні заводи, котрі активно з'являються в країнах світу, що розвиваються (країни Азії та Африки). За останні роки розвиток ринку сортової металопродукції призвело до необхідності диференціації виплавленого сортаменту.

Незважаючи на значний прогрес у конструкційному оснащенні та технологічному оформленні машин безперервного лиття сортових заготовок, більшість металургійних підприємств, де встановлені сучасні багаторівчаккові сортові МБЛЗ в основному вже досягли своїх пікових значень та функціональних технологічних можливостей.

Специфікою розливання сортової заготовки на багаторівчakovих сортових МБЛЗ є можливість контролю якості кожної заготовки, зокрема і їх поверхні. Виходячи з цього, подальший розвиток технології розливання сталі на сортових МБЛЗ неможливий без пошуку ключових технологічних показників, які забезпечують гарантоване отримання бездефектних безперервнолитих заготовок та максимальну продуктивність при досягненні низьких питомих витрат [1, 2].

У металургійній практиці широке поширення сортових МБЛЗ слід відносити до кінця 80-х - початку 90-х років минулого сторіччя, коли провідним машинобудівним фірмам вдалося забезпечити радикальне зростання продуктивності машин за рахунок суттєвого зростання швидкості

розливання [3-4]. Таке збільшення стало можливим за рахунок цілої сукупності технічних та технологічних рішень, які були спрямовані на оптимізацію якості сталі методами оптимізації її дозування та вивчення умов затвердіння заготовки в кристалізаторі.

В даний час високопродуктивними багаторівчковими сортами МБЛЗ оснащені сталеплавильні цехи, які працюють у структурі заводів з повним металургійним циклом [5-6], забезпечуючи, насамперед, власне прокатне виробництво, а також експортуючи заготовку. Як правило, такі цехи оснащені двома-трьома плавильними агрегатами з високою одиничною потужністю і двома і високопродуктивними сортами МБЛЗ, кожна з яких має переважно 5-6 рівчаків, рідше 7-8.

На відміну від міні-заводів (Наприклад ТОВ «Електроталь» м. Курахове), де основна частка металевої частини шихти представлена металобрухтом, у конвертерних цехах заводів з повним металургійним циклом існує додатковий потенціал щодо покращення якості металопродукції. Це обумовлюється високою чистотою чавуну, що використовується. Так, найбільшим виробником сортової заготовки в структурі конвертерного цеху в Західній Європі є металургійний завод «Saarstahl» (Німеччина), оснащений трьома 170 конвертерами і п'ятьма шестирівчковими сортами МБЛЗ [7-9]. При цьому на заводі виробляється широкий спектр конструкційних сталей, починаючи із середньовуглецевих сталей звичайної якості, що розливаються відкритим струменем, і закінчуючи високоякісними вуглецевими сталями (наприклад, кордові та пружинні), які розливаються із застосуванням системи «захисна труба – стопор – занурений стакан» .

У таблиці 1.1 наведено основні великі виробники безперервнолитої сортової заготовки у світі.

Таблиця 1.1 – Основні великі виробники безперервної сортової заготовки у світі

Підприємство	Виробник МБЛЗ	Кількість МБЛЗ × рівчаків	Основне обладнання	Ємність сталковша, т	Перетин відливаються заготовок, мм	Марки сталей, що розливаються
1	2	3	4	5	6	7
BHP INTEGRATED STEEL, WHYALLA WORKS (Південна Австралія)	CONCAST-STANDARD	1×5	BOF/TB LF** IR-UT***	130	□ 127-175	вуглецеві вуглецеві високоякісні
ACOMINAS GERAIS SA (Ору-Бранку, Бразилія)	DANIELI	1×6	BOF/TB LF, VD	230	□ 100-180	вуглецеві низьколеговані
CHS, COMPANHIA SIDERURGICA HUACHIPATO (Хуачіпато, Чилі)	CONCAST-STANDARD	1×5	BOF/TB LF	115	□ 140-180	вуглецеві вуглецеві високоякісні
Західно-Сибірський металургійний комбінат (Новокузнецьк, Росія)	DANIELI	1×8	BOF/TB LF	350	Ø 150-300 □ 100-160	вуглецеві низьколеговані
Челябінський металургійний комбінат (Челябінськ, Росія)	DANIELI	1×6	BOF/TB LF	140	□ 100-180	вуглецеві низьколеговані
АрселорМіттал Кривий Ріг (Кривий Ріг, Україна)	SIEMENS-VAI	1×6	BOF/TB LF	160	□ 150	вуглецеві низьколеговані
TRINECKE ZELEZARNY IRON WORKS (Тринець, Чехія)	CONCAST	1×8	BOF/TB LF, VD IR-UT	180	□ 108-120	вуглецеві низьколеговані
SAARSTAHL AG (Фельклінген, Німеччина)	SMS-DEMAG	4×6	BOF/CB VD	170	□ 150-180	вуглецеві вуглецеві високоякісні низьколеговані леговані

Продовження таблиці 1.1 - Основні великі виробники безперервнолитої сортової заготовки у світі

1	2	3	4	5	6	7
ISRG, ISPAT STAHL RUHRORT GMBH (Дуйсбург, Німеччина)	DANIELI	1×6	BOF/CB VD, LF	140	□ 130-160	вуглецеві вуглецеві високоякісні
BRITISH STEEL PSC, SCUNTHOPE WORKS (Скантроп, Великобританія)	CONCAST- STANDARD	1×8	BOF/CB VD, LF	300	□ 120-180	вуглецеві вуглецеві високоякісні
DURGAPUR, SAIL, DURGAPUR WORKS (Дургапур, Індія)	CONCAST	2×6	BOF/TB	110	□ 80-150	вуглецеві
NATIONAL IRANIAN STEEL CORP., EFAHAN WORKS (Ісфахан, Іран)	DANIELI	1×6	BOF/TB LF	130	□ 150-200	вуглецеві
ACCIAIERIE DI CORNIGLIANO (Корнільяно, Генуя, Італія)	CONTINUA- CONCAST	1×8	BOF/TB	240	Ø 120 □ 120-160	вуглецеві низьколеговані
LUCCINI SIDERURGICA, PIOMBINO WORKS (Пьомбіно, Італія)	VAI/ CONTINUA- CONCAST	1×6	BOF/TB LF, VD	120	□ 140-170	вуглецеві високоякісні
NIPPON STEEL CORP., KIMITSU WORKS (Кіміцу, Японія)	NSC CONST.DIV.	1×8	BOF/CB	235	□ 122-130	вуглецеві
NKK CORPORATION, FUKUYAMA WORKS (Фукуяма, Японія)	SUMITOMO HI	1×6	BOF/CB VD	245	□ 135/150	вуглецеві
SID. LAZARO CARDENAS LAS TRUCHAS (Лазаро Карденас, Мексика)	CONCAST VAI	2×6	BOF/TB, LF	125	□ 75-130	вуглецеві низьколеговані
PAKISTAN STEEL MILLS CORP. (Карачі, Пакистан)	VAI	1×6	BOF/TB	130	□ 80-150	вуглецеві низьколеговані
* BOF/TB – кисневий конвертер із верхнім дуванням; ** LF – установка «ківш-піч»; *** IR-UT - встановлення комплексного доведення сталі в ківші; **** BOF/CB– кисневий конвертер із комбінованим дуванням; ***** VD – камерний вакууматор						

1.1. Сучасні технологічні цехи з МБЛЗ для виробництва сортової заготовки в Україні.

Для Українських виробників однією з головних проблем є питання забезпечення конкурентоспроможності довгомірної продукції на світовому ринку. Українські виробники сортової заготовки на практиці використовують різного роду технічні умови, які мають, з одного боку, враховувати специфіку виробничого циклу конкретної групи металургійних підприємств, з другого - сукупність вимог компаній, які, забезпечують експорт Української металургійної продукції. Помітне зменшення ціни на сортову заготовку є наслідком зниження експортного потенціалу металургійних підприємств через відсутність повної відповідності в технічних умовах та міжнародних стандартах [10-13].

У таблиці 1.2 подано основні технічні характеристики сучасних сортових МБЛЗ, Українського металургійного комплексу.

Отримання сортової заготовки на МБЛЗ забезпечує істотну технологічну перевагу металургійному підприємству, оскільки виключає з технологічного циклу групу обтискних і великосортних станів, забезпечуючи тим самим суттєвий енергозберігаючий ефект [14-16].

Одним із стратегічних напрямків розвитку сталеплавильних цехів як в Україні так і в усьому світі є створення вискоєфективних комплексів, що забезпечують безперервне розливання сталі в заготовки, близькі за перетином до готового довгомірного прокату. Додатковий економічний ефект досягається при отриманні заготовок порівняно малих перерізів (квадрат, круг) у великих сталеплавильних цехах з високою одиничною продуктивністю агрегатів та широкими можливостями застосування сучасних методів позапічного доведення сталі [14,15].

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики сучасних сортових МБЛЗ, Українського металургійного комплексу.

Підприємство	Виробник МБЛЗ	Кількість МБЛЗ × рівчаків	Основне обладнання	Ємність сталковша, т	Перетин заготовок, мм	Марки сталей, що розливаються
1	2	3	4	5	6	7
ТОВ «Електросталь», м. Курахово	STB	1×3	IAF, LF	60	□ 100-140	вуглецеві низьколеговані
ПАТ «Камет-Сталь», м. Кам'янське	VAI-POMINI	2×7	BOF/TB LF	250	□ 100-160	Середньовуглецеві, низькокремністі, низьколеговані
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» м. Кривий Ріг Україна	SIEMENS-VAI	3×6	BOF/TB LF	160	□ 150	середньовуглецеві низьколеговані
Єнакіївський металургійний завод, м. Єнакієве	HKMZ	2×6	BOF/TB LF	160	□ 100-150	вуглецеві низьколеговані
«Донецький електрометалургійний завод», м. Донецьк	Danieli	1x6	IAF, LF, VD	120	□100-150 ●120-180	вуглецеві низьколеговані
«Інтерпайп», м. Дніпро	Danieli	1x5	IAF, LF, VD	160	●150-290	Високоякісний, трубні, колісні
Стіл Груп «ТСА», м. Павлоград	STB	1x2	IAF, LF	15	□110-□150	високолеговані

* BOF/TB – кисневий конвертер із верхнім дуттям; ** LF – установка «ківш-піч»; *** IR-UT - встановлення комплексного доведення сталі в ковші; **** BOF/CB– кисневий конвертер із комбінованим дуванням; ***** VD – камерний вакууматор, *****IAF– електродугова сталеплавильна піч,

1.2. Аналіз прогресивних технологічних схем розливання сортової заготовки на високошвидкісних МБЛЗ та оцінка основних показників її якості.

В останні два десятиріччя спостерігається значний прогрес у конструкційному оснащенні та технологічному оформленні машин безперервного лиття сортових заготовок. Це дозволило адаптувати процес безперервного лиття до різних технологічних побудов та видів продукції, які максимально враховують кон'юнктуру ринку [3,9].

За цей час номінальна продуктивність типових сортових МБЛЗ зросла принаймні в 2-2,5 рази. Це створило передумови для розширення сортаменту марок сталі, що розливаються, зниження питомих витрат на розливання і скорочення обслуговуючої інфраструктури. При цьому обсяг капітальних вкладень при будівництві МБЛЗ зріс значно меншою мірою, ніж її продуктивність, що забезпечує зменшення реальних інвестицій на тонну сталі, що розливається.

У стандартах більшості країн світу під сортовою заготовкою мається на увазі квадратна заготовка, що отримана при розливанні на МБЛЗ або шляхом прокатки з зливка на блюмінгу з перетином, як правило, від 100x100 мм до 160x160 мм (зустрічається також перетин 180x180 мм). Крім того, до сортових заготовок відноситься кругла заготовка діаметром від 100 до 180 мм та спеціальні фасонні профілі, наприклад, типу «собача кістка» (малого перетину).

Машини безперервного лиття для розливання сортової заготовки мають від 1 до 8 рівчаків. Продуктивність 1 рівчака сучасної сортової МБЛЗ складає 180-250 тис.т. заготовки на рік. Зараз у світі виробляється понад 360-380 млн. т безперервнолитої сортової заготовки на рік [17-18]. Сучасна високопродуктивна сортова машина безперервного лиття заготовки є складним металургійним агрегатом, що складається з безлічі вузлів та механізмів, робота яких поєднана між собою. Найбільшого поширення при розливанні сталі набули сортові МБЛЗ радіального типу (рисунок 1.1).

Конструктивною особливістю таких машин є наявність кристалізатора певного радіусу (відповідає базовому радіусу МБЛЗ), що забезпечує одержання радіальної технологічної лінії. Після затвердіння заготовки здійснюється її

розгинання, порізка та видача готової заготовки на холодильник у горизонтальній площині.

Як правило, сортові машини забезпечують розливання квадратної заготовки кількох перерізів з розміром сторони в діапазоні 100-160 мм. У ряді випадків сортові машини охоплюють ширший спектр перерізів, дозволяють наприклад, розливати круглу заготовку діаметром до 180-200 мм.

Базовий радіус швидкісних сортових МБЛЗ зазвичай становить 5-10 м. Зона вторинного охолодження має, як правило, 4-5 секцій, які обладнані форсунками для розбризкування води (для останніх секцій це може бути водоповітряна суміш) [17-19].

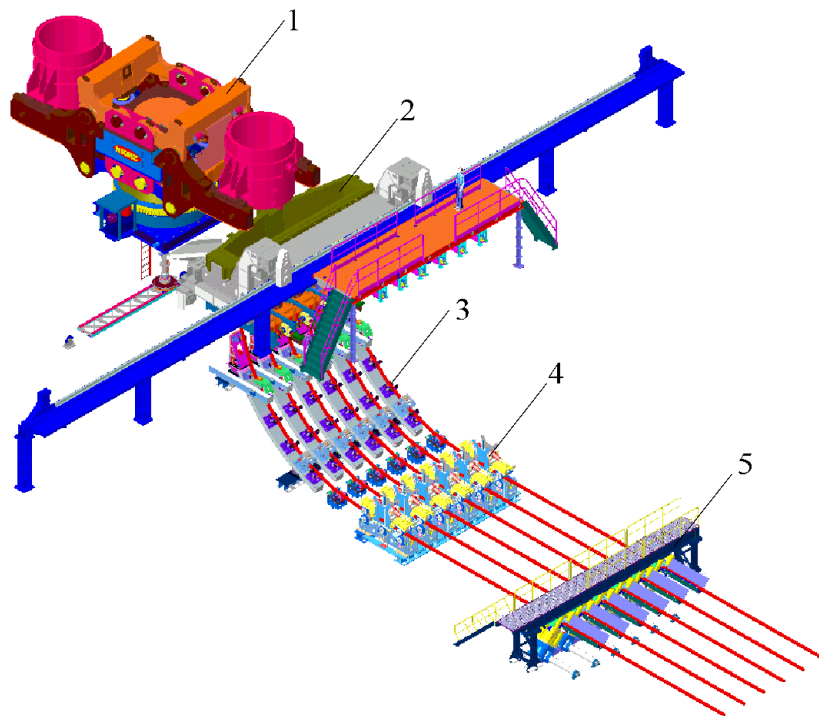


Рисунок 1.1 – Схема 6-ти рівчачкової сортової МБЛЗ

- 1 – поворотний стенд зі сталерозливними ківшами;
- 2 – промковщ; 3 – розливальна дуга та ЗВО; 4 - тягнуче-правильна машина;
- 5 – пристрій для різання заготовки

В останнє півтора десятиріччя різко позначилася тенденція використання багаторівчачкових сортових МБЛЗ з високою (до 6-7 м/хв) швидкістю розливання,

що дозволяє отримувати сортову заготовку в сталеплавильних цехах з плавильного агрегату високої одиничної продуктивності [20-22].

Розливання сталі з підвищеними швидкостями зазвичай обумовлюється технологічними обмеженнями тривалості розливання одного ківша великої ємності (60-80 хвилин) при фіксованому числі рівчаків МБЛЗ. Для багаторівчачових сортових МБЛЗ кількість срівчаків коливається в межах від 3 до 8 одиниць. При цьому поширення 7-8 рівчаків МБЛЗ у світі носить все ж таки обмежений характер (всього кілька десятків МБЛЗ).

Узагальнюючи відомі підходи в галузі технології розливання сортової заготовки, слід зазначити, що технологічні переливи сталі здійснюються як відкритим (незахищеним), так і закритим (спеціальна вогнетривка проводка) струменем (рисунок 1.2).

Найбільш широке промислове поширення у світі для сортових МБЛЗ набуло розливання сталі відкритим струменем (Рисунок 1.2 г,е) через стакан-дозатор (Рисунок 1.3) строго регламентованого діаметра [23-25].

Відкритим струменем зазвичай розливають сталі, що не піддаються строгому контролю макроструктури при подальшій прокатці і призначені для отримання металопродукції у вигляді періодичного профілю, кутиків, двотаврів, дроту, арматури та ін. Найбільшого поширення така схема розливання набула в умовах міні металургійних заводів [26-27].

Основним стратегічним завданням розливання сталі відкритим струменем на сортових МБЛЗ є мінімізація виробничих витрат, яка найбільшою мірою може бути реалізована під час роботи довгими та наддовгими серіями з одного промковшу [28]. На даний час тривалість серії на сучасних сортових МБЛЗ досягає 70-100 плавок або 3-5 діб безперервного розливання серії.

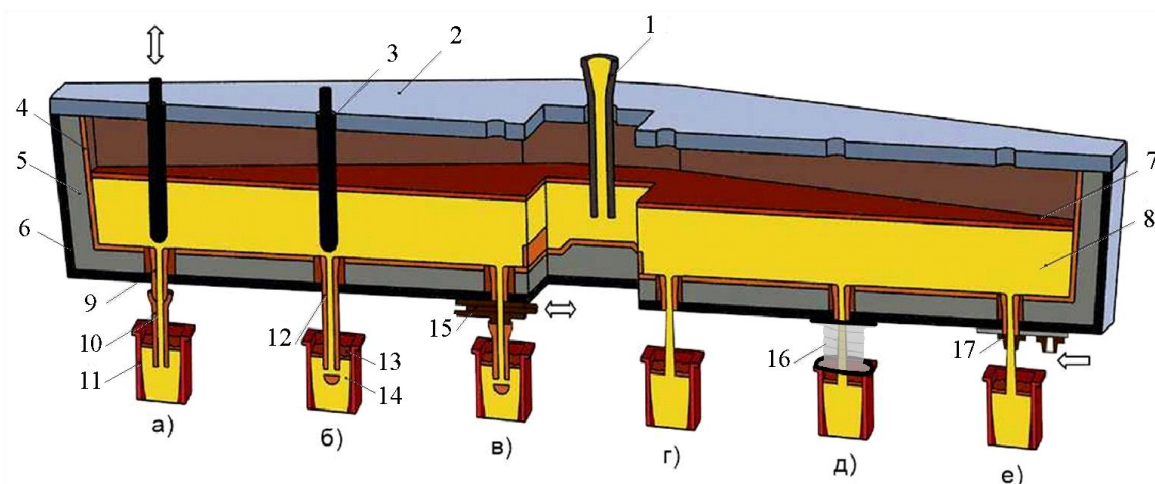


Рисунок 1.2 – Схема розливання сталі на сортовий МБЛЗ закритим (а, б, в, д) та відкритим (г, е) струменем

1 – захисна труба; 2 – кришка промковша; 3 – стопор-моноблок; 4, 5, 6 – робочий, теплоізоляційний та арматурний шар футерівки; 7 – ТПС; 8 – рідкий метал у промковші; 9 – стакан-дозатор; 10 – занурювальний стакан; 11 – кристалізатор; 12 – занурювальний стакан, поєднана зі стаканом-дозатором; 13 – ШУС; 14 – рідкий метал у кристалізаторі; 15 – триплитний шибєрний затвор; 16 – сиффон; 17 – стакан-дозатор для швидкої зміни.

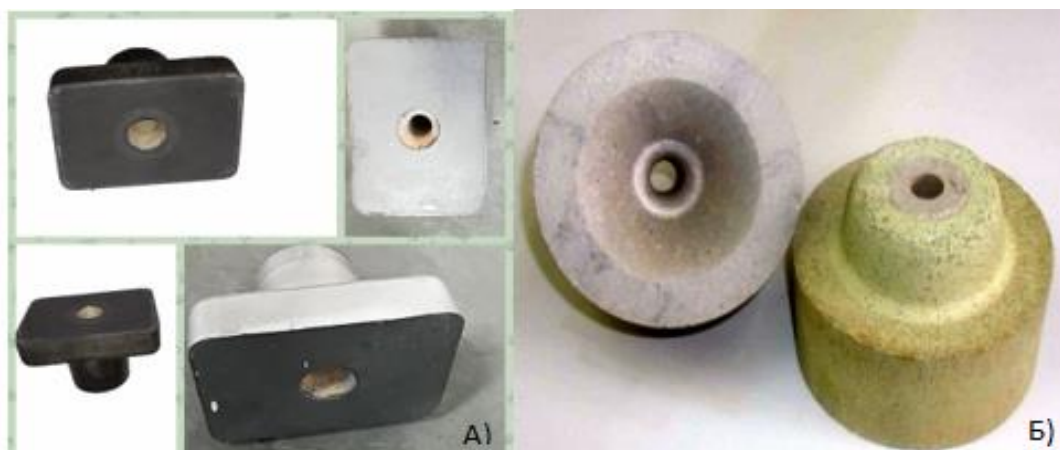


Рисунок 1.3 – Загальний вигляд стаканів-дозаторів системи MNC

А)-(змінний) нижній, Б)-постійний (верхній)

При цьому вкрай важливим технологічним елементом є забезпечення високого показника серійності розливання безпосередньо з одного промковша

[20,23, 29-30]. Це дозволяє досягти стабільності роботи машини, а також знижує питомі витрати на вогнетриви та втрати металу, пов'язані із зупинкою МБЛЗ [30].

У 90-х роках минулого сторіччя сформувалася тенденція підвищення серійності розливання з одного промковша. Даний аспект зумовив прагнення технологів оптимізувати рух потоків металу і мінімізувати зношення футерівки.

Узагальнюючи відомі технічні рішення щодо футерівки проміжних ківшів і застосування додаткових функціональних елементів, їх можна розділити на дві основні групи за сукупністю технологічних операцій, що виконуються:

– промковші, у яких створюються максимально сприятливі умови для розливання наддовгими серіями (щонайменше кілька десятків плавок) з метою мінімізації витрат на розливання;

- промковші, в яких широко використовуються операції рафінування рідкої сталі в сукупності з функціями усереднення та дозування металу.

Стратегія мінімізації витрат, насамперед, відноситься до високопродуктивних сортових МБЛЗ, що працюють в умовах металургійних міні-заводів [31-36]. Для таких умов лиття процеси рафінування сталі в промковші, як правило, передбачаються в мінімальному обсязі. При цьому основним критерієм ефективності роботи МБЛЗ є можливість роботи наддовгих серій без заміни проміжного ківша та зупинки машини. Наприклад, на металургійному міні-заводі Badische Stahlwerke GmbH (Німеччина) середня серійність становить 45-50 плавок з одного ківша на 5-ти рівчаківій сортовій машині [37], на міні-заводі ТОВ «Електросталь» (м. Курахово) досягнуто середньої серійності 40 плавок (максимальна серія - 63 плавки тривалістю 60 год 40 хв) [38-40].

Робочий шар футерівки промковша виконується шляхом торкретування з використанням вогнетривких мас на основі високоякісного магнезитового порошку. Принципова схема проміжного ківша МБЛЗ наведено на рисунку 1.4.

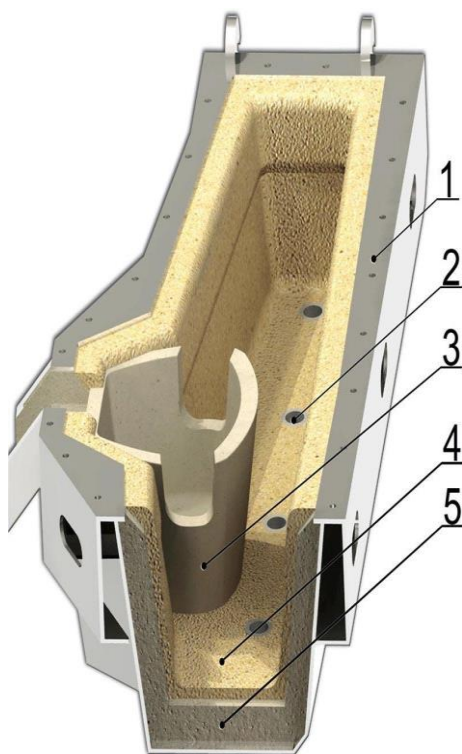


Рисунок 1.4 - Принципова схема проміжного ківша багаторівчачкової МБЛЗ:

- 1 – сталевий кожух; 2 – розливний вузол; 3 – металоприймач;
 4 – робочий шар (торкрет-маси на основі MgO); 5 – арматурний шар футерівки (бетон на основі Al_2O_3)

Товщина робочого шару футерівки зазвичай становить 60-80 мм, а при розливанні наддовгими серіями - 90-110 мм. Основною зоною зносу робочого шару футерівки промковша, що лімітує тривалість розливання, є область, яка прилягає до місця падіння струменя, сталі, що витікає зі сталерозливного ківша. Крім того, підвищений знос футерівки промковша спостерігається, як правило, по всьому периметру шлакового пояса, що пояснюється хімічною активністю покривного шлаку по відношенню до робочого шару футерівки [41-42].

Важливу роль у стабільності роботи футерівки промковша грає організація руху потоків сталі. Метал, що потрапляє в промковш зі сталерозливного ківша, рухається у вигляді компактного струменя вертикально вниз зі швидкістю кілька метрів на секунду. При падінні такого струменя може відбуватися залучення в перемішування покривної теплоізолюючої суміші, а також удар струменя об дно проміжного ківша, що призводить до зміни напрямку руху потоків: вгору під

нахилом або горизонтально. При цьому днище ківша у місці удару інтенсивніше руйнується і має підвищений знос.

У зоні падіння струменя також створюється високотурбулентна область, яка закручує поверхневий шлак, тим самим зменшуючи ерозійну стійкість футерівки у шлаковому поясі. Зазвичай ця зона футерівки проміжного ківша виконується з міцніших вогнетривів. З метою зниження ерозійного впливу на шлаковий пояс футерівки проміжного ківша і зменшення збурення на поверхні металу, що розливається, можливе застосування захисної труби. Захисна труба дозволяє створювати спрямований потік металу, що вводиться безпосередньо під верхній рівень наливу металу в проміжному ковші. Однак необхідно відзначити, що частим явищем при розливанні із застосуванням захисної труби є її перекид при встановленні, або в процесі розливання, що призводить до порушення гідродинамічних потоків у проміжному ківші і може призвести до передчасного зносу пристроїв, що застосовуються для гальмування металу. Для гальмування струменя в області контакту з днищем використовуються додаткові приймальні пристрої, які виконуються зі спеціальних високоміцних вогнетривких матеріалів [43].

Аналізуючи роботу проміжного ківша багаторівчачкової сортової МБЛЗ при розливанні довгими і наддовгими серіями [44-46], слід виділити такі функціональні особливості:

- постійний контакт певної частини днища проміжного ківша з падаючим струменем металу призводить до розмивання вогнетривкого шару в місці падіння струменя;

- періодична багаторазова зміна рівня металу в промковші (під час заміни сталерозливних ківшів) змінює динаміку руху потоків сталі в ньому;

- вирування та активне перемішування металу з покривним шлаком у зоні падіння струменя обумовлюють підвищений знос робочого шару футерівки;

- попадання шлаку зі сталерозливного ківша істотно впливає на властивості та товщину покривного шлаку в проміжному ківші по ходу розливання;

- Різниця температури сталі, що витікає з центральних і крайніх рівчаків проміжного ківша, повинна бути мінімальною, що забезпечує стабільність процесу лиття.

Врахування всіх особливостей роботи проміжного ківша для забезпечення розливання наддовгими серіями неможливе без застосування спеціальних пристроїв (металоприймачів та порогів), що впливають на гідродинаміку в його рідкій ванні протягом усього циклу розливання.

Впровадження у практику розливання різних порогів, шлакових і фільтраційних перегородок разом із бойною плитою дозволило вирішити низку проблем організації руху потоків. Однак подібні пристрої мають кілька істотних недоліків, пов'язаних з точністю установки перегородок і порогів в промковші. Так, внаслідок неправильного монтажу таких виробів, відбувається їхнє швидке руйнування (або заростання), що призводить до дисбалансу процесу розливання, аж до зупинки МБЛЗ [47-49].

Велика продуктивність багаторівчачових сортових МБЛЗ досягається за рахунок високої швидкості витяжки заготовки (5-6 м/хв) шляхом застосування параболічних багатоконусних гільзових кристалізаторів, довжина яких становить 0,8-1,1 м [50-55]. Разом з тим, при використанні параболічних та багатоступінчастих гільз кристалізаторів може спостерігатися підвищене тертя заготовки на виході з них. Це викликає підвищене зношування стінок гільзи при великій конусності кристалізатора. Тому розливання із застосуванням параболічних кристалізаторів вимагає строго регламентованих параметрів лиття.

У ході розливання сталі внутрішня поверхня гільзи знаходиться в постійному динамічному контакті з твердою скоринкою заготовки, оскільки кристалізатор здійснює зворотно-поступальний рух. Для підвищення експлуатаційної стійкості внутрішня поверхня гільзи має спеціальне захисне покриття завтовшки 0,07-0,12 мм, яке забезпечує додатковий опір зносу, обумовлене тертям твердої скоринки заготовки поверхню гільзи кристалізатора [54-56].

Теоретичні розрахунки умов твердіння заготовки в кристалізаторі сортової МБЛЗ показують, що можливий ресурс підвищення швидкості формування

твердої скоринки в мідній гільзі ще не вичерпано. Наприклад, за даними Б.Томаса, технологічно можлива швидкість витяжки квадратної заготовки перерізом 120×120 мм може становити більше 6,0 м/хв [57]. Отже, для подальшого підвищення швидкості витяжки сортової заготовки, мабуть, слід забезпечувати більш інтенсивне і рівномірне відведення тепла безпосередньо від гільзи кристалізатора. При цьому необхідно також брати до уваги той факт, що інтенсивність теплопередачі досягає максимальних значень на ділянці прямого контакту поверхні гільзи з рідкою сталлю (тобто 80-150 мм під меніском) і виявляється у кілька разів менше у нижній частині кристалізатора [58-59].

Процеси, що відбуваються в кристалізаторі МБЛЗ, багато в чому визначають якість поверхні та підповерхневих зон безперервнолитої заготовки. Для забезпечення стабілізації умов витяжки заготовки з кристалізатора йому повідомляють зворотно-поступальні рухи, що мінімізує величину сили тертя заготовки та кристалізатора, а також покращує умови подачі мастила (олії або шлакоутворювальної суміші) у зазор між заготовкою та стінками кристалізатора. При цьому певні відхилення від раціональних параметрів лиття та умов твердіння можуть призводити не тільки до утворення дефектів, але й до аварійних ситуацій типу «прорив» та «обрив» заготовки в процесі лиття [60-64].

1.3. Аналіз технологічних схем дозування металу при розливанні сортової заготовки, оптимізації схеми підведення металу в кристалізатор (доцільність оптимізації вибору вогнетривких матеріалів, що витрачаються, для розливання).

У практиці безперервного розливання сталі особлива увага приділяється дозуванню сталі, що витікає з проміжного ківша. При дозуванні металу з проміжного ківша прагнуть сформуванню певну питому витрату сталі (відповідно до швидкості витяжки заготовки), максимально компактно поверхню струменя, а також захистити її від вторинного окиснення.

Слід мати на увазі, що в процесі витікання сталі через пристрій, що дозує, відбувається трансформація геометричної форми певних зон дозуючих вогнетривів. Це може відбуватися або внаслідок ерозійного зносу, при сколах і

розтріскування вогнетривких виробів, або при відкладенні оксидів алюмінію (або інших шлакових включень) на їх робочій поверхні [65-72].

Розрізняють три основні методи дозування сталі: розливання закритим струменем, дозування за допомогою шиберного затвора, розливання сталі відкритим струменем.

Першою розглянемо розливання сталі закритим струменем на схемі «стакан-дозатор» - «стопор-моноблок» (рисунок 1.5), яка є одним з найбільш поширених способів дозування сталі в процесі її розливання.

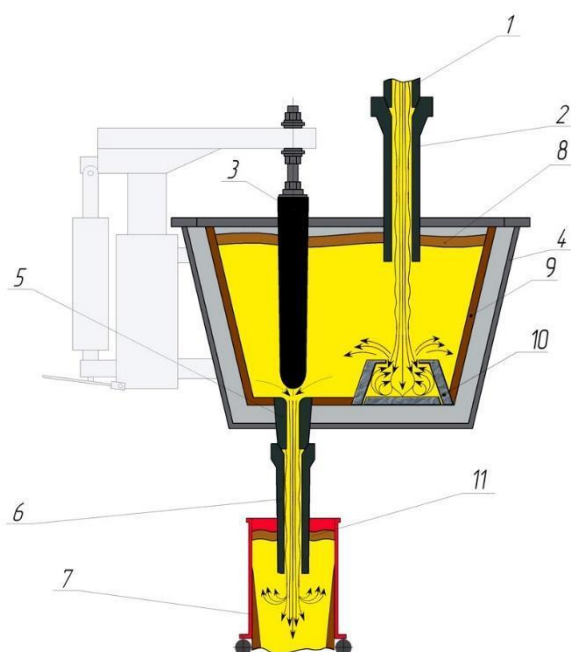


Рисунок 1.5— Загальна схема розливання закритим струменем: 1 –колектор сталерозливного ківша; 2 – захисна труба; 3 – стопор; 4 - промківш; 5 – стакан-дозатор; 6 – занурювальний стакан; 7 – кристалізатор; 8 – теплоізолююча суміш; 9 – торкрет-покриття; 10 – металопріймач; 11 – шлакоутворююча суміш

При цьому витрати металу регулюються положенням головки стопора щодо стакана-дозатора. Тим часом стійкість стакана-дозатора визначається загальною міцністю матеріалу, що перешкоджає його руйнуванню в процесі розливання, локальним руйнуванням стакана-дозатора в зоні його контакту з головкою стопора (1), сколюванням матеріалу в місці контакту з занурювальним стаканом

(2) і швидкістю заростання його внутрішньої порожнини (3) неметалевими та шлаковими включеннями (рисунок 1.6 а).

Крім того, при частій заміні занурювального стакана може відбуватися часткове руйнування (сколювання) нижньої частини стакана-дозатора. В цьому випадку відбувається вільне підсмоктування повітря у внутрішню порожнину занурювального стакана, що значно підвищує інтенсивність вторинного окиснення струменя сталі. Стакан-дозатор зазвичай виготовляють із корундографітового матеріалу методом ізостатичного пресування [73-74].

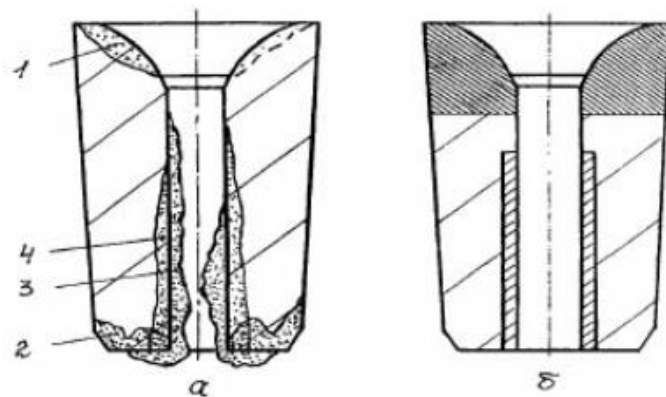


Рисунок 1.6. Схематичне подання характеру зносу стакана-дозатора в процесі розливання (а) та конструкції стакана для розливання наддовгими серіями (б): 1 – руйнування в зоні контакту з головкою стопора; 2 – руйнування у зоні контакту з занурювальним стаканом; 3 – заростання внутрішньої порожнини; 4 – ерозія внаслідок руйнування при контакті зі струменем сталі

Для умов тривалого розливання виявилось доцільним верхню частину стакана-дозатора виконувати з міцнішого матеріалу (того ж, що і головка стопора). Зменшення швидкості заростання внутрішньої порожнини стакана-дозатора може бути досягнуто з використанням спеціального керамічного «антиклогінгового» покриття, принцип дії якого полягає у зв'язуванні оксидів алюмінію, що осідають на поверхні стакана-дозатора, у легкоплавкі сполуки. Встановлено, що це покриття у 1,3-1,5 рази підвищує тривалість роботи стакана-дозатора без промивань киснем. Разом з тим, швидкість заростання стакана-дозатора значною мірою залежить від розвитку процесів вторинного окиснення

сталі, що зумовлює доцільність проведення заходів щодо захисту, сталі від взаємодії з киснем повітря на ділянці «сталерозливний ковш - промковш» [75-80].

Стопор-моноблок є складовою функціональною частиною промковшу МБЛЗ, що забезпечує дозовану подачу сталі в кристалізатор, перекриття каналу стакан-дозатора у разі технологічної необхідності, подачу аргону в струмінь сталі та ін. У більшості випадків стопор-моноблок працює в досить важких умовах, що супроводжуються термічними внутрішніми напруженнями, механічними ударами та ерозійним руйнуванням [81-83]. Отже, забезпечення його високої експлуатаційної стійкості є досить складним технологічним і виробничим завданням.

Виконані авторами в умовах низки заводів України та інших країн промислові тестування стопорів-моноблоків різної конструкції та геометричної форми, різного хімічного складу та вироблені різними вогнетривкими фірмами показали, що багато з них не відповідають комплексу вимог, що забезпечують розлив наддовгими серіями [84]. Основними чинниками виходу стопорів з експлуатації під час розливання є:

- інтенсивний ерозійний знос стопора в області шлакового поясу, що закінчується його полумкою і втратою рівчака МБЛЗ;
- ерозійне зношування головки стопора, що перешкоджає нормальному процесу витікання металу з промковша (руйнування компактної форми струменя тощо);
- руйнування стопора в зоні його кріплення зі штангою стопорного механізму в процесі експлуатації через неміцність (або втрати міцності) вузла кріплення, що включає керамічні та металеві частини;
- підсмоктування повітря в місці кріплення стопора і подальше окиснення вуглецю у внутрішніх шарах футерівки стопора, що викликає її розміщення;
- короблення вилки, що з'єднує штангу та стопорний механізм, за рахунок її нагріву в процесі експлуатації, що призводить до некривання (руйнування) стопора під час розливання.

Як показує статистичний аналіз, найчастішою причиною виходу стопора-моноблока з експлуатації є руйнування вузла кріплення. Отже, при виборі раціональної схеми кріплення стопора та сталеві штанги необхідно брати до уваги той факт, що зона фактичного кріплення стопора знаходиться тривалий час в умовах впливу агресивного середовища, підвищених температур, динамічних навантажень тощо [84-85].

Розглянемо другий спосіб дозування сталі в процесі розливання за допомогою шиберного затвора.

У теперішній час, ряд заводів світу замість стопора-моноблока в промковші застосовує триплитний шиберний затвор [86-87]. В Україні таку схему успішно застосовують на Курахівському електromеталургійному міні-заводі (ТОВ «Електросталь» м. Курахове). В цілому, як показує практика, триплитний шиберний затвор може за певних умов забезпечити розлив серіями 8-9 плавов, що помітно поступається показникам, які досягаються при використанні стопорів-моноблоків. Основною ланкою, що лімітує, є заростання (клокінг) внутрішньої порожнини сталепровідного каналу, протяжність якого у випадку з шиберним затвором збільшується в кілька разів [88-89]

Тим часом застосування шиберних затворів певною мірою змінює умови розливання, що може впливати як на процес лиття, так і на якість безперервнолитої заготовки. Особливо це стосується процесу старту МБЛЗ та регулювання витрати металу в ході розливання.

Характерною особливістю конструкції шиберного затвора (рис.1.7) промковша є прагнення по можливості збільшити внутрішній переріз стакан-дозатора по відношенню до реально необхідного перерізу для забезпечення відповідної витрати сталі. Відповідно, процес регулювання витрати металу здійснюється за рахунок зміни положення середньої плити шиберного затвора [88-90]

Дозування сталі здійснюється за рахунок часткового перекриття каналу розливання при зміні положення середньої плити. При цьому виконані промислові дослідження дозволили обґрунтувати ряд позитивних моментів

застосування шиберних затворів для безперервного розливання сортової заготовки [91]. Зокрема, використання технології розливання через триплитний шиберний затвор забезпечує плавність і точність регулювання потоку сталі через їхнє менше зношування, а також забезпечує широкі можливості для реалізації комплексного автоматичного управління всім процесом розливання.

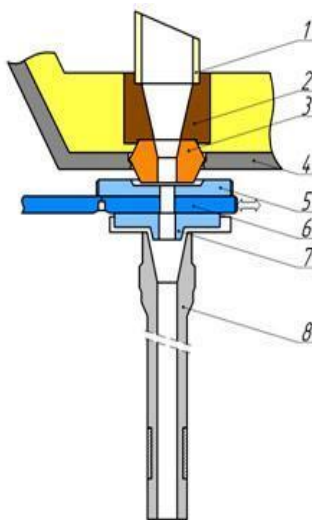


Рисунок 1.7 – Схема подачі сталі із промковшу через триплитний шиберний затвор: 1 – стартова труба; 2 – гніздовий блок; 3 – стакан-дозатор; 4 – кожух промковша; 5 – верхня плита шиберного затвора; 6 – середня плита шиберного затвора; 7 – нижня плита шиберного затвора; 8 – занурювальний стакан.

Загалом порівняно з розливом зі стопором-моноблоком розлив з промковша через триплитний шиберний затвор має такі досить серйозні функціонально-технічні недоліки:

- при розливанні через триплитний шиберний затвор подовжується система каналів від проміжного ківша до занурювального стакана, що підвищує ймовірність її заростання. Враховуючи велику довжину цих каналів, є практично неможливим здійснення операції промивання каналу за допомогою кисню;

- оскільки регулювання витрати металу в шиберному затворі здійснюється за рахунок зміни положення середньої плити, то в ході такого дроселювання відбувається руйнування компактної геометричної форми струменя, її розбризкування та руйнування вогнетривів, що входять у контакт зі струменем;

наявність певного зазору між плитами шибєрного затвора є додатковим джерелом підсмоктування повітря (вторинного окиснення) в струмінь сталі, що особливо негативно проявляється при розливанні вакуумованих марок, сталі і сталі з підвищеним вмістом алюмінію;

Ще одним поширеним способом дозування металу є вільне витікання металу з проміжного ківша.

Даний спосіб забезпечується при строгій регламентації діаметра отвору стакан-дозатора (швидкість розливання при цьому регулюється за рахунок висоти наливу металу в промковші);

Для забезпечення даної схеми розливання застосовуються спеціальні стакани-дозатори (рисунок 1.8), оснащені цирконієвими вставками, що мають високу вогнетривку та ерозійну стійкість. Вони забезпечують тривале розливання (від 40 до 70 годин) без істотної зміни внутрішнього діаметра (від 15 до 20 мм).

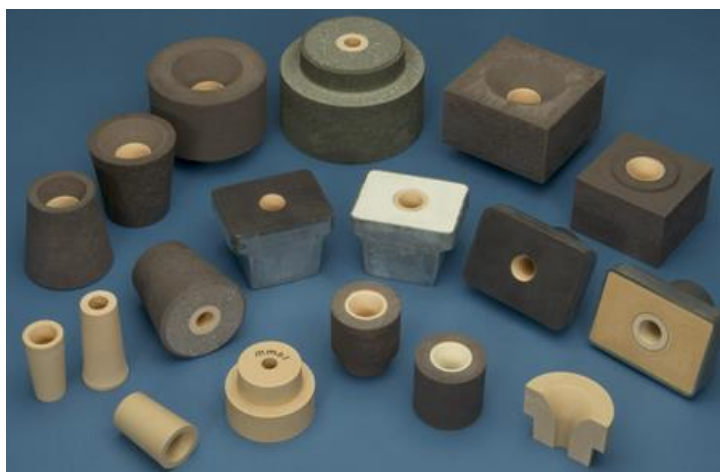


Рисунок 1.8 – Основні типи стаканів-дозаторів сортових МБЛЗ та калібрувальних вставок до них.

При постійному феростатичному тиску та однаковій питомій витраті сталі струмінь металу, що вільно витікає зі стакан-дозатора, має суцільну ділянку, довжина якої достатня для досягнення нею дзеркала металу в кристалізаторі.

Характерною особливістю розливання сталі відкритим струменем через стакан-дозатор є малий переріз його внутрішньої порожнини, що становить зазвичай 15-19 мм залежно від швидкості розливання та перерізу заготовки. При

цьому підтримання рівня металу в кристалізаторі здійснюється за рахунок зміни швидкості витягування заготовки та рівня металу в промковші. Можливості таких методів регулювання витрати металу вкрай обмежені порівняно з розливанням через стопор-моноблок або шиберний затвор. Відповідно стабільність розливання протягом всього циклу роботи промковша може бути досягнута лише за умови збереження постійного перерізу стакан-дозатора.

У процесі розливання спокійних невакуумованих марок сталі часто відзначається затягування або заростання стаканів-дозаторів промковшів. Основними причинами затягування стакан-дозатора слід вважати намерзання сталі в каналі через недостатньо високу її температуру і велику температуропровідність матеріалу стакан-дозатора, а також прилипання до його стінок неметалевих і шлакових включень у процесі розливання. При цьому «промивання» киснем вкрай негативно позначається на процесі розливання в цілому через погіршення організації струменів, що надходять до кристалізаторів, внаслідок порушення геометрії внутрішньої порожнини стакан-дозатора. Відповідно це значно збільшує ступінь вторинного окиснення сталі.

З іншого боку, в результаті взаємодії рідкого металу з матеріалом стакан-дозатора може відбуватися його просочення оксидами заліза, марганцю, кремнію та алюмінію. У разі утворення легкоплавких фракцій на межі метал-вогнетрив відбуватиметься розмивання стінки стакан-дозатора.

Отже, питання вибору конструкції та матеріалу стакан-дозатора для промковшу при розливанні на сортових МБЛЗ є дуже важливим з погляду розливання сталі довгими серіями. В даний час на практиці перевага надається комбінованим стаканам-дозаторам, що складаються з двох керамічних частин, виготовлення та термічна обробка яких здійснюється за самостійними технологіями.

Внутрішня вставка такого стакан-дозатора виготовляється з дорогого діоксиду цирконію (зміст на рівні 95%). При цьому матеріал зовнішньої частини стакан-дозатора має досить низьку теплопровідність. Зовнішня частина стакан-

дозатора може також виготовлятися з матеріалу з високим вмістом Al_2O_3 (50 - 80%), який має низьку схильність до термічних тріщин за нижчою ціною.

Загалом використання комбінованих стаканів-дозаторів із високоякісною вставкою з діоксиду цирконію дозволяє безперервно розливати через них сталь протягом 15 – 20 годин. Більш ранній вихід їх з експлуатації зазвичай пов'язується із затягуванням їхньої внутрішньої порожнини. На практиці також може спостерігатися підвищене розмивання внутрішньої порожнини стакана-дозатора, що насамперед пояснюється недостатньо високими антиерозійними властивостями матеріалу.

Останніми роками серед провідних зарубіжних фірм дедалі більше уваги приділяється створенню системи устаткування швидкої заміни стакана-дозатора у разі його руйнації чи затягування.

Такі пристрої передбачають розташування під днищем проміжного ківша спеціальної касети (рисунок 1.9), що має принаймні два стакана-дозатора, швидка установка яких у робоче положення (цикл переміщення стакана-дозатора становить ~0,2-0,3 с) здійснюється за допомогою спеціального гідроприводу.

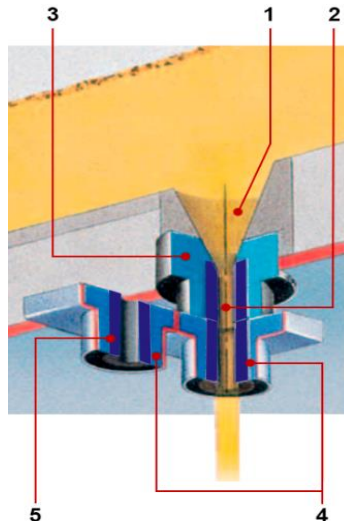


Рисунок 1.9 – Принципова схема швидкої заміни стакана-дозаторів проміжного ківша сортової МБЛЗ: 1 – лійка набивної маси або формований гніздовий блок; 2 - калібрований струмінь металу; 3- верхній стакан-дозатор типової конструкції; 4 – нижній (змінний) стакан-дозатор; 5 – калібрована ZrO_2 - вставка стакана-дозатора.

Принцип роботи пристрою та порядок його обслуговування в процесі експлуатації є наступними. Під час дозованого розливання сталі з проміжного ківша кристалізатори МБЛЗ вертикальні канали стакан-дозатора і сталевипускного каналу вогнетривкого гніздового блоку, або сформованої лійки, поєднуються. При цьому резервний стакан-дозатор розміщений між стаканом-дозатором і силовим гідроциліндром. Притискання стакан-дозатора, що знаходиться в роботі, забезпечується попередньо стиснутими пружинами. У разі суттєвої зміни діаметра вертикального каналу стакан-дозатора, викликаного заметалюванням або розмиванням, здійснюють його заміну резервним. Для цього в порожнину силового гідроциліндра подають під надлишковим тиском робочу рідину. Шток циліндра, переміщаючись з одного крайнього положення в інше, проштовхує обидві стакан-дозатора на розрахункову відстань, в результаті чого елемент, що вийшов з ладу, зміщується вліво, а його місце під сталевипускним стаканом займає резервний, що призводить до стабілізації швидкості витікання рідкої сталі з проміжного ківша в кристалізатор. Після цього шток циліндра повертають у вихідне положення, циліндр знімають з пристрою, поздовжній паз якого встановлюють черговий резервний стакан-дозатор, а що вийшов з ладу прибирають. Потім гідроциліндр знову встановлюють та фіксують на корпусі пристрою. Застосування пристрою для швидкої заміни стакан-дозатора забезпечує підвищення стабільності процесу лиття за рахунок хорошої організації витікання струменя та квазіпостійної миттєвої витрати сталі. Крім того, такий пристрій дозволяє оперативно змінювати діаметр стакан-дозатора та, відповідно, регулювати швидкість витяжки заготовки.

Така схема забезпечує зниження витрат на вогнетриви через підвищення тривалості розливання з одного промковшу, зменшення питомої частки відходів металу по поясах, кінцевій та головній обрізі та залишкам у промковші. Крім того, завдяки забезпеченню гарної організації струменя підвищується якість сталі при розливанні довгими серіями за рахунок мінімізації процесів вторинного окиснення на ділянці промковш-кристалізатор.

Разом з тим застосування пристрою для швидкої заміни стакан-дозатора передбачає використання спеціальних дорогих вогнетривких виробів, що пов'язано з необхідністю забезпечення високої точності контакту між змінною стаканом-дозатором і базовим стаканом-дозатором промковша по всій площині ковзання. Безумовно, це збільшує витрати на розлив.

Дозування металу із застосуванням систем швидкої зміни стакан-дозаторів отримало широке застосування і добре зарекомендувало себе завдяки забезпеченню стабільного швидкісного режиму розливання сталі довгими серіями на сортових машинах безперервного лиття заготовок за рахунок швидкої зміни стакан-дозаторів.

Однак у науковій літературі практично відсутні роботи, спрямовані на дослідження закономірностей розвитку «несуцільності» та «віяла» (порушення компактності) витікання струменя по ходу розливання серії металу на МБЛЗ, що грають одну з ключових ролей у виникненні поверхневих дефектів безперервнолитої заготовки при розливанні відкритим струменем за допомогою систем швидкої зміни. 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, мають дуже актуальний характер.

Висновки по першому розділу

1. Світовий ринок сортової заготовки розвивається у напрямку підвищення вимог до її якості, як на макро, так і на мікрорівні. Разом з тим більшість виробників сортової заготовки віддають перевагу прямому одержанню сортових заготовок на високошвидкісних сортових МБЛЗ. При цьому перевага віддається заготовкам меншого перерізу (максимально наближеним до розмірів перерізу кінцевого продукту), оскільки в умовах прискореного затвердіння меншою мірою розвиваються ліквацийні та усадкові процеси.

2. Завдяки останнім досягненням у галузі безперервного розливання, на практиці створені всі необхідні передумови для виробництва сортової заготовки у сталеплавильних цехах з високою одиничною потужністю основних агрегатів (152-350 т). Це досягається шляхом використання сортових МБЛЗ із продуктивністю одного рівчака на рівні 225-250 тис.т рідкої сталі на рік. Як правило, такі цехи оснащені двома-трьома плавильними агрегатами та двома і більш високопродуктивними сортовими МБЛЗ, кожна з яких має переважно 5-6 рівчаків, іноді 7. Стрижневим питанням забезпечення високої продуктивності є висока швидкість розливання, яка сьогодні досягає рівня 5-7 м/хв при розливанні на заготовлю перетином 100-140 мм.

3. Одним із основних критеріїв ефективності роботи сучасної сортової МБЛЗ є можливість розливання металу наддовгими серіями без заміни проміжного ківша та зупинки машини. Досягнення високих показників тривалості розливання сталі з одного промковша слід, перш за все, пов'язувати з раціональним підбором ключових вогнетривких компонентів футерівки проміжного ківша, що виключають передчасне їх руйнування, за рахунок високих експлуатаційних характеристик, що дозволяє забезпечити стабільний і тривалий процес розливання.

4. Для підвищення конкурентоспроможності сортової заготовки доцільно забезпечувати розлив сталі відкритим струменем на максимально можливих швидкостях із застосуванням системи дозування сталі з «швидкою зміною стакана-дозатора» (ШЗД), що істотно дозволяє знизити питомі витрати та підвищити техніко-економічні показники розливання серії на МБЛЗ. При цьому слід приділяти особливу увагу компактності витікання струменя на ділянці від лійки проміжного ківша до кристалізатора.

2. ОСНОВНІ МОДЕЛІ, МЕТОДИКИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Необхідність у розробці нових технологічних і технічних рішень щодо підвищення продуктивності сортової МБЛЗ та підвищення якості безперервної заготовки вимагає обґрунтованих системних рішень, які можуть базуватися на глибокому розумінні процесів витікання сталі на ділянці промковш-кристалізатор. Розвиток даних уявлень може бути досягнуто на основі глибоких порівняльних оцінок, які вдається отримати з використанням методів фізичного та математичного моделювання.

2.1. Розробка фізичної моделі та методики моделювання витікання сталі на ділянці стакан-дозатор-кристалізатор

Обмежені можливості за обсягами розливання сталі роблять актуальним прагнення модернізувати МБЛЗ таким чином, щоб їх продуктивність зростала. Основними напрямками вдосконалення сортових МБЛЗ при такій постановці завдання є підвищення серійності розливання (з одного промковша) і збільшення швидкості витяжки заготовки.

Точне знання параметрів потоку рідкої сталі (а саме, просторовий розподіл компонентів швидкості, турбулентна кінетична енергія і т.д.) при витіканні металу з проміжного ківша у кристалізатор є необхідною умовою для аналізу або оптимізації ефективності процесу.

Тим часом для забезпечення стабільного процесу розливання на сортовій МБЛЗ з підвищеною продуктивністю необхідно брати до уваги, що умови перебування металу в промковші можуть суттєво змінюватися. Це, перш за все, відноситься до часу перебування металу в промковші і коливань його рівня в процесі заміни сталерозливного ківша. Також необхідно мати на увазі, що розливання наддовгими серіями передбачає збільшення товщини робочого шару футерівки промковша до 100-120 мм (номінальна товщина шару зазвичай становить 50-60 мм), що суттєво зменшує масу металу в промковші.

Оскільки промислові експерименти пов'язані з оптимізацією процесу розливання стали неможливими з міркувань безпеки персоналу, втратою виробничого часу, а також пов'язані з низкою технічних труднощів (великі витрати на випробування, неможливість візуалізації характерних стадій процесу, складність вимірювання значень важливих фізичних величин), велике значення в дослідній практиці набули методи фізичного та математичного моделювання [91-93].

Основний зміст моделювання полягає в тому, щоб за результатами дослідів з фізичними моделями, які можна виготовити з меншими витратами коштів та часу, визначити найкращі характеристики натурального виробу (процесу), а іноді просто встановити невідомі раніше закономірності чи явища [94]. Фізичне моделювання ґрунтується на глибокому проникненні в досліджуваний процес, у розробку експериментальних та теоретичних методів дослідження для отримання достовірних результатів та систематичних правил та рекомендацій, необхідних для вирішення конкретних практичних завдань.

Для розвитку існуючих уявлень та якісної оцінки ефективності запропонованих рішень найбільш широкого поширення набуло фізичне моделювання, що дозволяє, в тому числі, візуалізувати рух потоків при закінченні витікання металу зі сталерозливного ківша в проміжний ківш, а згодом і кристалізатор. Однак для коректної оцінки явищ, що спостерігаються, і перенесення їх на промислові об'єкти представляється вкрай важливим правильний вибір параметрів модельної системи [95-102].

Всі дослідження, присвячені проблематиці підвищення ефективності функціонування промковшів МБЛЗ, можна умовно розділити на дослідження, що виконуються на фізичних моделях, математичних моделях, а також комбіновані дослідження, що поєднують попередні два підходи, а також перевірку основних результатів у промислових умовах.

При розробці параметрів фізичної моделі переслідувалась умова, щоб на моделі відтворювалися і досліджувалися процеси, якісно однакові з процесами, які є у реальних промислових апаратах і об'єктах.

Для вирішення поставленої задачі був зроблений вибір раціональних геометричних параметрів фізичної моделі та контроль таких параметрів безперервного розливання, як швидкість та витрати рідини, що потрапляє у вузол розливу проміжного ківша. За допомогою теорії подібності були визначені параметри розливання, які впливають на процеси, що відбуваються в сталерозливному вузлі проміжного ківша.

Отримана в результаті оптимізації система критеріїв подібності має вигляд [8]:

- $\left(\frac{V_{СТР}}{V_{П}}\right)$ - відображає необхідність подібності швидкостей потоків у моделі сталерозливного вузла проміжного ківша (постійному та змінному стаканам-дозаторам) та самому сталерозливному вузлі проміжного ківша (постійному та змінному стаканам-дозаторам);

- $\left(\frac{\rho V_{П}^2 d}{\eta}\right)$ - критерій Рейнольдса (Re), де:
 ρ - густина рідини, кг/м³; v - швидкість потоку, м/с; d - гідравлічний діаметр, м; η -коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, кг/(м·с).

Фізично Re є відношенням сил інерції до сил внутрішнього тертя і, крім того, є критерієм, який визначає характер течії рідини;

- $\left(\frac{\rho L V_{П}}{\sigma}\right)$ - критерій Вебера (We), де
 ρ - щільність; σ - коефіцієнт поверхневого натягу; L - характеристична довжина; v - швидкість.

We є відношенням сил інерції до сил поверхневого натягу;

- $\left(\frac{V_{П}^2}{gd}\right)$ - критерій Фруда (Fr), де:

v - швидкість потоку, м / с; D – визначальний лінійний розмір, м;
 g - прискорення вільного падіння, м/с².

Фізично Fr характеризує вплив сили земного тяжіння на процес перетікання металу з проміжного ківша через сталерозливний вузол (постійний стакан-дозатор - кристалізатор).

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 (оргскла) були створені фізичні моделі, верхнього (постійного) і нижнього (змінного) стаканів-дозаторів. Масштаб для розроблених моделей було обрано – 1:1 Дані масштаби є достатніми для візуального спостереження за всіма гідродинамічними процесами, які відбуваються у сталерозливному вузлі проміжного ківша , практично в режимі реального часу. Загальний вигляд моделюючого стенду, який імітує сталерозливний вузол сортової МБЛЗ із встановленим механізмом швидкої зміни стакана-дозатора, наведено на рисунок 2.1.

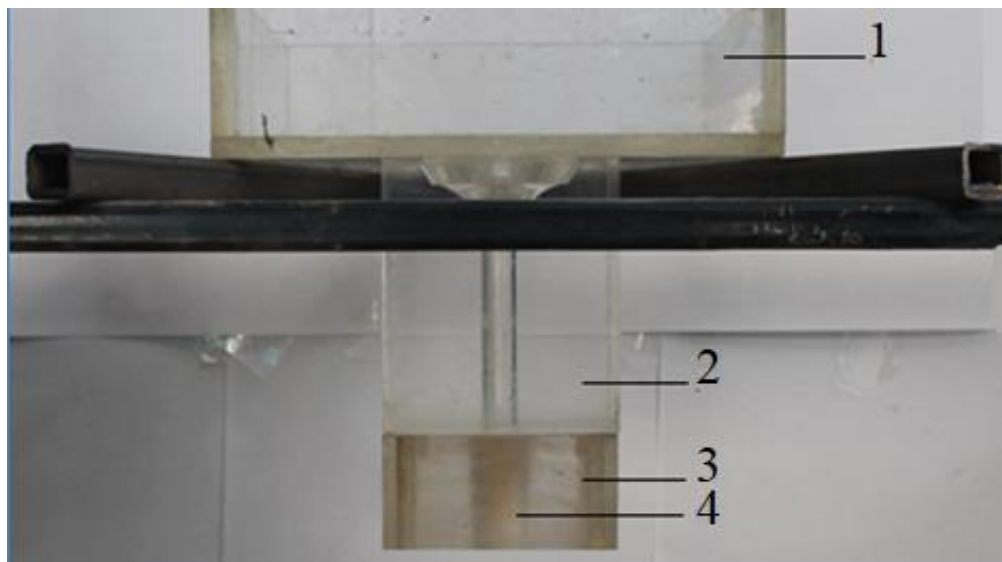


Рисунок 2.1. – Загальний вид лабораторної установки для вивчення гідродинаміки потоків, що протікають у сталерозливному вузлі проміжного ківша

Лабораторна установка (рисунок 2.1) включає резервуар, поз. 1, розміщений над верхнім (постійним) стаканом-дозатором (для забезпечення безперервного потоку рідини з постійною витратою), що імітує простір проміжного ківша над рівчаком, прозору модель верхнього стакана дозатора поз. 2 з можливістю спостереження характеру поведінки рідинного потоку в калібрувальному отворі верхнього стакана-дозатора і моделі нижнього стакана-дозатора поз. 3., калібрувальний отвір стакана формується за допомогою цирконієвих вставок поз. 4 відповідних різному періоду розливання металу через них (на момент початку періоду розливання, через 1,5, 3,5 і 9 годин безперервного розливання металу).

Циркуляція води у системі забезпечувалася насосом. У якості робочої рідини, що моделює рідку сталь, використовувалася вода при температурі 18-25°C, оскільки значення в'язкості води при кімнатній температурі і сталі в діапазоні температур позапічної обробки та розливання досить близькі один до одного (табл.2.1) [103-105].

Таблиця 2.1 - Фізичні властивості води при температурі 18-25 °C та сталі при температурі 1600 °C

Параметр	Вода	Сталь
Молекулярна в'язкість, μ , кг/м·с	0,001	0,0064
Щільність, ρ , кг/м ³	1000	7014
Кінематична в'язкість, $\nu = \mu/\rho$, м ² /с	10-6	0,913 · 10-6
Поверхневий натяг, σ , Н/м	0,073	1,6

В основі експериментальних досліджень було застосування цирконієвих («калібрувальних») вставок стакана-дозатора з різним ступенем зношення та різного ступеня засмічення (заростання), які були вилучені з відпрацьованих (після експлуатації) стаканів дозаторів після 1.5, 3,5 та 9 годин безперервного розливання металу (рисунок 2.2), що дозволяє оцінити вплив ступеня зношення та заростання цирконієвої вставки на розвиток порушень компактності витікання струменя металу.



Рисунок 2.2 – Цирконієві «калібровані» вставки які витягнуті з відпрацьованих (після експлуатації) стаканів дозаторів після 1, 1,5, 4 і 9 годин безперервного розливання металу, що застосовуються при фізичному моделюванні..

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 ході фізичного моделювання вивчалися особливості руху потоків у порожнині стаканів-дозаторів, їх вплив на розвиток дефектів течії струменя металу, внаслідок чого розвиваються процеси хвилеутворення на поверхні металу в кристалізаторі.

Прояв порушень компактності витікання та розбризкування струменя металу (дефект типу «віяло»), можливо пояснити за рахунок процесів пов'язаних із заростанням внутрішніх порожнин цирконієвих вставок «стаканів-дозаторів» у процесі розливання, що призводить до зміни характеру витікання металу зі стакана-дозатора у кристалізатор. При цьому порушується симетричність потоку металу, що у свою чергу виступає передумовами для виникнення збурень на поверхні металу в кристалізаторі, які в результаті призводить до хвилеутворення, наплесків і набризків сталі на стінки кристалізатора (рисунок 2.3).

В результаті цього в поверхневому шарі заготовки утворюються дефекти типу «заворот кірки», «рубчик», що є причиною аварійних проривів металу під кристалізатором [106].

З метою визначення причин виникнення вихрових («віялових») явищ необхідно провести комплекс додаткових досліджень для глибшого вивчення їхньої природи, а саме:

– дослідження впливу конструктивних різновидів цирконієвих вставок на щільне формування витікання струменя металу зі стакана-дозатора та розвиток вихрових явищ;

- дослідження утворення вікнино-подібних явищ при переливанні металу з проміжного ківша в кристалізатор у процесі безперервного розливання сталі, які сприяють затягуванню неметалевих включень у канал стакана-дозатора;

– дослідження зношення футерівки проміжного ківша на заростання сталерозливного каналу цирконієвої вставки, а також залежність цього зношення від турбулентного переміщення металу.

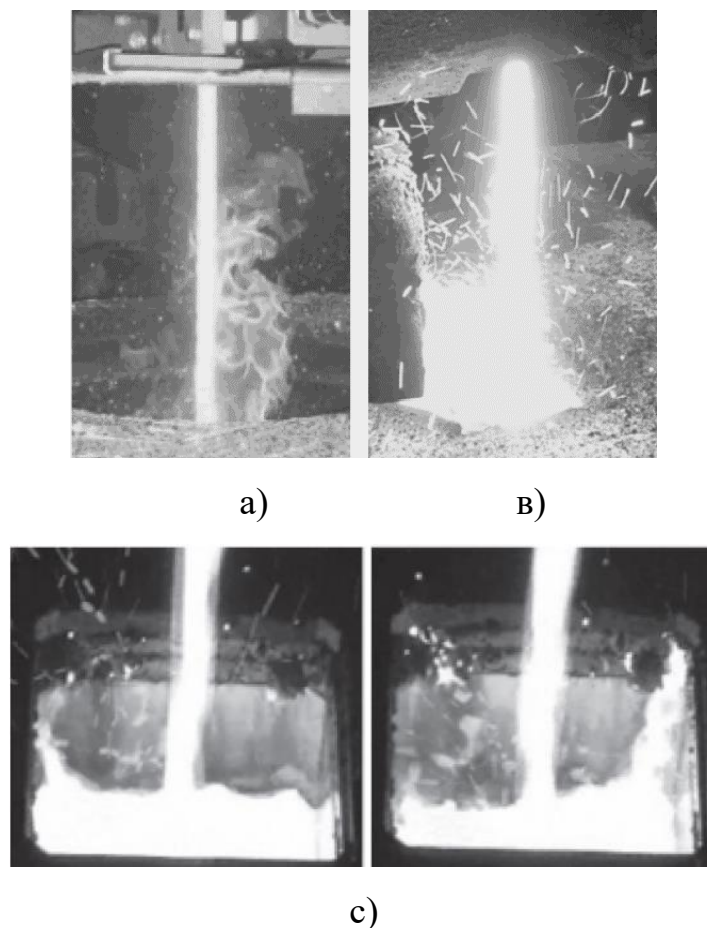


Рисунок 2.3 – Порушення симетричності витікання металу, що призводить до хвилеутворення металу, наплесків і набризків сталі на стінки кристалізатора (а – щільний та стійкий струмінь; в – «віяльний» струмінь; с – сплеск та бризки (хвилі) сталі на стінки кристалізатора та хвилеутворення на поверхні металу в кристалізаторі).

2.2 Дослідження утворення вікнино-подібних явищ при переливанні металу з проміжного ківша в кристалізатор у процесі безперервного розливання сталі.

При проведенні комплексного фізичного моделювання утворення вікнино-подібних явищ при переливанні металу з проміжного ківша в кристалізатор за допомогою систем зі швидкою зміною стаканів-дозаторів у процесі безперервного розливання сталі, переслідувалося дві основні умови подібності між модельною та повномасштабною системою: геометрична та динамічна [107-108]. Геометрична подоба означає фіксоване співвідношення кожного розміру моделі відповідного розміру повномасштабної системи. Динамічна подоба пов'язана з різними силами, що діють на струменевий елемент, і вимагає тотожності відповідних сил модельної та повномасштабної системи.

При цьому в гідравлічній системі проміжного ківша, що функціонує в стабільному та стійкому режимі з ізотермічною течією, рівновагу між різними силами, що діють на струменевий елемент, можна описати рівнянням Нав'є-Стокса [91].

$$N_{Eu} = f(N_{Re}, N_{Fr}) \quad (2.1)$$

де N_{Re} та N_{Fr} – число Рейнольдса та число Фруда, відповідно.

Рівняння (2.1), що є основним для динамічної подібності між двома геометрично подібними системами, може точно задовольняти модельної та повномасштабної системи промковша за умови, що масштабний геометричний коефіцієнт, $\lambda = (L_{mod}/L_{f,s})$ дорівнює одиниці. Протікання турбулентних процесів у рідкій ванні промковша носить обмежений характер, а перенесення імпульсу за допомогою сил молекулярного тертя вважається вторинним за ступенем важливості. Відповідно це означає, що число Фруда є домінуючим для потоків металу в промковші МБЛЗ, і, отже, ці потоки регулюються в основному інерційними і гравітаційними силами, що діють на рідини.

При цьому для забезпечення умов виконання критерію Фруда необхідно забезпечувати відповідність припливу (витрати) води у модельній системі до швидкості припливу рідкого металу у повномасштабному проміжному ківші [106, 109].

Для візуального вивчення характеру розвитку утворення вікнино-подібних явищ, які сприяють затягуванню неметалевих включень із поверхні металу, була виготовлена фізична модель із світлопроникного матеріалу (оргскла). При виконанні моделювання висота наливу рідини у моделі могла змінюватись в діапазоні 0,1-1,5 від номінальної висоти металу в проміжному ківші (від 100 до 700 мм). Для дослідження було виготовлено модель проміжного ківша з металоприймачем типової конструкції (типу «турбостоп»), який відповідає найбільш відомим конструкційним рішенням, що застосовуються в промисловості.

Подача рідини у виготовлену модель здійснювалася відкритим струменем з ємності, розташованої над моделлю проміжного ківша, яка імітувала сталерозливний ківш (висота 0,8 метра). У днищі відповідно до конструкції промковша було зроблено сім отворів (стаканів-дозаторів), що імітують витікання металу в кристалізатори сортової МБЛЗ. При цьому рідина, що витікає, збиралася спеціальну ємність і за допомогою насосу та перекачувалася назад в ємність над модельною установкою. Обраний масштаб моделі (1:3) забезпечував візуальне спостереження за всіма гідродинамічними процесами, що протікають у промківші, практично в режимі реального часу. Загальний вигляд лабораторної моделі проміжного ківша представлено рисунку 2.4.



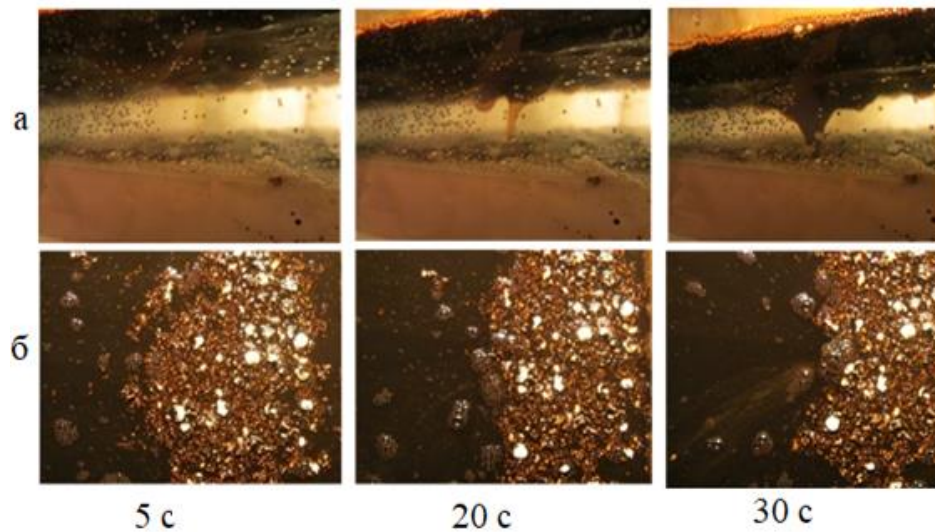
Рисунок 2.4 – Лабораторна модель, яка виготовлена для дослідження зтягування неметалевих включень, за допомогою вікнино-подібних явищ:

1 – модель металоприймача типу «турбостоп»; 2 – модель проміжного ківша ; 3 – отвори які імітують стакани-дозатори.

З метою найбільш точної оцінки процесів, що відбуваються в проміжному ківші при високошвидкісному розливанні, сталі відкритим струменем весь процес моделювання знімали цифровою відеокамерою, що дозволило вибирати найбільш характерні моменти та визначати напрямки руху потоків у порожнині проміжного ківші. Для чіткості візуальної оцінки при подачі моделюючої рідини зі сталерозливного в проміжний ківш її підфарбовували, для підфарбовування низхідних потоків використовувалися кольорове чорнило.

У світлі вищесказаного, щодо процесу безперервного лиття сортової заготовки, викликає інтерес дослідження впливу процесів вікнино-утворення на залучення (зтягування) неметалевих включень у низхідний потік. У цій роботі вивчали процес залучення неметалевих включень з поверхні металу під дією вікнино-подібних явищ витікання металу за допомогою прозорої моделі проміжного ківша (рисунок 2.4) при розливанні відкритим струменем із найпоширенішим стаканом-дозатором діаметром 17,0 мм.

Як імітатори покривного шлаку використовували частинки пінопласту і та силіконове масло.



а-вид з боку; б – вид зверху;

Рисунок 2.5 – Процес залучення імітаторів покривного шлаку до порожнини стакан-дозатора

Вибраний масштаб моделі (1:3) забезпечував візуальне спостереження за всіма гідродинамічними процесами, що протікають у проміжному ківші у реальному часі. Таким чином, на створеній за допомогою теорії подоби фізичної моделі проміжного ківша існує можливість моделювання гідродинамічних процесів як перетікання металу зі сталювша в промковш, так і випуску металу з промковша з усіма супутніми явищами.

2.3 Дослідження зношення футерівки проміжного ківша, що призводить до заростання сталерозливного каналу стакан-дозатора.

При проведенні досліджень зношення робочої футерівки проміжного ківша для кількісної оцінки зношення були застосовані зразки матеріалу, що розмивається (на основі желатину та інертного цукру). Зразок останнього представлений рисунку 2.6



Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд зразка, який імітує робочу футерівку проміжного ківша

Істотним обмеженням тривалості роботи футерівки промковша може бути інтенсивне зношування футерівки в зоні шлакового пояса, а також зони, що прилягає до нього на межі поділу метал-шлак. В силу того, що робоча футерівка в процесі експлуатації піддається різним навантаженням протягом тривалого часу: хімічна ерозія; механічне руйнування; гідродинамічний вплив тощо. Розробка технологічних прийомів які дозволяють знизити зношування (вимивання) футерівки і тим самим знизити ймовірність заростання стаканів-дозаторів, а також виключити попадання неметалевих включень у готову продукцію при розливанні, є актуальним завданням для дослідників, що у свою чергу неможливо без виконання фізичного моделювання.

Необхідно виділити такі функціональні особливості при розливанні наддовгими серіями:

- струмінь металу, що падає зі сталерозливного ківша, має високу кінетичну енергію в момент падіння, так постійно контактує з певною частиною днища проміжного ківша , що, безумовно, призводить до прискореного зношення робочого шару футерівки в місці падіння струменя;

- багаторазова періодична зміна рівня металу в проміжному ківші (під час перековшування) змінює динаміку руху потоків сталі, має негативний вплив на стійкість робочого шару футерівки проміжного ківша , а також на якість готової

продукції через затягування неметалевих включень (у тому числі частинок зношеної футерівки) у вузол проміжного ківша з подальшим попаданням у готову продукцію.

Це призводить до одержання браку під час виробництва продукції на стадії прокату заготовки. Також затягування неметалевих включень в сталерозливний вузол проміжного ківша призводить до налипання даних частинок у калібрувальній порожнині стакана-дозатора змінюючи тим самим характер витікання струменя металу та утворення вихрових явищ;

- забезпечення мінімальних значень різниці температур сталі, яка витікає із середніх та крайніх рівчаків.

Зношування типових зон торкрет шару проміжного ківша впродовж розливання, а також залежність цього зношення, від турбулентного переміщення металу від «бійного» місця до периферійних стінок був вивчений і проаналізований на моделі за допомогою розташування експериментальних зразків (рис 2.6) в різноманітні зони проміжного ківша та імітації розливання протягом 15 хвилин. Ідентифікація динаміки зношення робочого футерування проміжного ківша, представлена рисунку 2.7.

З метою визначення втрати маси зразка в результаті експерименту застосовувалися лабораторні ваги фірми «Axis» модель а6000, характеристики яких представлені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Характеристика лабораторних ваг, що застосовуються в ході досліджень

Характеристика	Показник
Найбільша межа зважування (НГЗ), р.	6000
Найменша межа зважування (НмПВ), р.	5
Дискретність відліку (d), р.	0,1
Клас точності	4

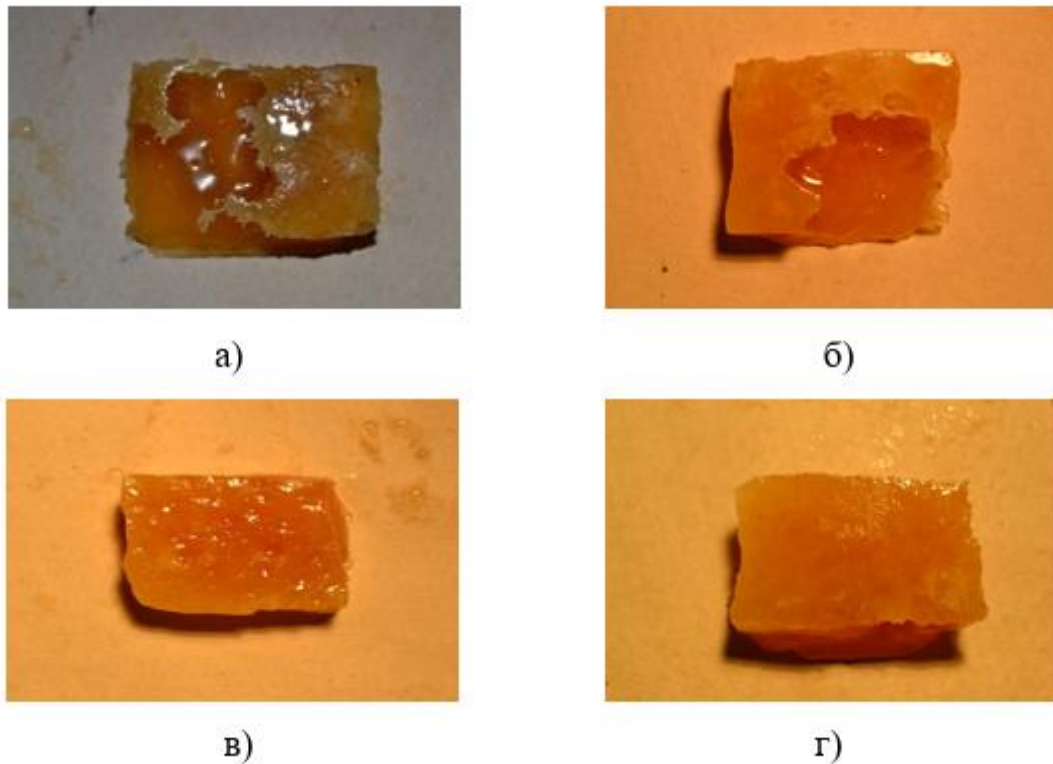


Рисунок 2.7 – Зразки імітаторів футерівки після 15 хвилин розливання: а), б) розташування біля бічних стінок проміжного ківша ; в) на рівні наливу металу; г) між третім та четвертим рівчачками

Таким чином, розроблені фізичні моделі стакан-дозатора і проміжного ківша дають можливість виконувати комплексні порівняльні дослідження та оцінки, що дозволяють не тільки візуалізувати окремі стадії розливання металу в проміжному ківші сортової МБЛЗ, але також вивчати процеси вікнино-подібних явищ і зтягування неметалевих включень (вогнетривкої футервіки), вплив конвективних потоків на руйнування стінки промковша, дослідити динаміку зношення футерівки.

Використані в цій роботі моделі та способи досліджень забезпечують не тільки візуальні оцінки, але також дають можливість виконання кількісних оцінок результатів для отримання інформації про характеристики рідкого середовища в системі, що моделюється. Розроблені комплексні та досить надійні фізичні моделі, що дозволяють виконувати прогнози, обґрунтовувати конструкторські рішення, які потім можуть бути використані у промислових умовах.

2.4. Розробка математичної моделі витікання металу на ділянці верхній (постійний)- нижній (змінний) стакан-дозатор.

На сьогоднішній день, математичне моделювання закріпилося як один з найбільш ефективних інструментів дослідників та інженерів передових компаній-розробників, який є однією з основних частин систем автоматизованого проектування [110-111]. Математичне моделювання дозволяє отримати сукупну картину всього перебігу рідини в об'ємі і візуалізувати в графічному вигляді поля швидкостей, тисків або температур у всій області течії. У той час як фізичне моделювання дозволяє отримати інформацію з вимірювальних приладів, в декількох точках, де передбачається розвиток досліджуваних явищ.

Також при математичному моделюванні виключаються проблеми, пов'язані з збуреннями досліджуваних процесів датчиками, що використовуються в експериментах, при ньому відсутні технічні труднощі, що викликаються малими або великими розмірами об'єктів, що досліджуються, високими або низькими температурами, пожежонебезпечними або токсичними речовинами і т.п. При цьому чисельне рішення можна отримати для реальних умов досліджуваного процесу, що далеко не завжди можливо при експериментальних дослідженнях [112-113].

Зазначені переваги, а також стрімкий розвиток програмного забезпечення та чисельних методів дозволяють успішно використовувати універсальні програмні комплекси для математичного моделювання витікання металу через сталерозливний вузол сортової МБЛЗ у тому числі через механізми зі швидкою зміною стаканів-дозаторів.

У зв'язку з тим, що сучасні підходи до математичного моделювання дають потужні та універсальні засоби дослідження, доцільно виділити найбільш важливі вимоги до математичних моделей: універсальність, що характеризує повноту відображення моделлю досліджуваних властивостей реального об'єкта; адекватність – здатність відображати необхідні властивості об'єкта з похибкою не вище заданої; точність, що оцінюється ступенем збігу значень характеристик

реального об'єкта і значень цих характеристик, отриманих за допомогою математичних моделей.

На сьогоднішній день, розроблено та реалізовано безліч математичних моделей, що розглядають різноманітні аспекти «металургії» проміжного ківша : гідродинаміку, резидентний час, поведінку неметалічних включень та перенесення теплової енергії, електромагнітне перемішування, процеси турбулентності тощо. [114-128].

При виконанні даних досліджень, була поставлена мета, розробка достовірно надійної та прогнозуючої математичної основи для вивчення процесів масопереносу, який відбувається при високошвидкісному розливанні відкритим струменем через змінні стакани-дозатори систем «ШЗД», на багаторівчачових МБЛЗ. 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, неметалевих включень); температурний стан розплаву при перемішуванні (теплоперенесення, масоперенесення).

Відомо, що математичні моделі базуються переважно на рівняннях Нав'є-Стокса, які включають рівняння нерозривності (закон збереження маси); рівняння імпульсу (закон збереження імпульсу); рівняння енергії (закон збереження енергії) [129-132]. Ці закони, подані у вигляді диференціальних рівнянь у приватних похідних, вирішуються методом кінцевих елементів із застосуванням стандартних пакетів для комп'ютерного моделювання руху рідини (PHOENICS, FLOW, CFX, ANSYS) або за допомогою програм, що самостійно розробляються, та реалізують цей метод [133-137].

З усіх відомих комерційних програмних продуктів найбільшого поширення у світовій практиці набули пакети ANSYS. Слід зазначити, що ці пакети дають можливість отримувати приблизно однакові результати і, на думку багатьох дослідників, є досить надійними.

Розробка математичної моделі виконана з використанням прикладного пакета Ansys, що реалізує метод кінцевих елементів (МКЕ) у рамках модуля

Flotran, який відображає технологію моделювання CFD (Computerized Fluid Dynamics). Як розрахункова область при створенні геометричної моделі був прийнятий внутрішній обсяг калібрувальних стаканів, заповнений рідкою сталлю. Модель розглядалася як нестационарна, турбулентна, з однофазним уявленням розплаву сталі.

Математичну основу моделі складають закони збереження маси, імпульсу та енергії, які представлені у вигляді наступних рівнянь.

Рівняння нерозривності, що відповідає закону збереження маси, має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0, \quad (2.2)$$

де v_x , v_y , v_z – компоненти вектора швидкості у напрямках x , y та z відповідно;

ρ – густина;

x , y , z – Глобальні декартові координати;

t – час.

Закон збереження імпульсу, що зв'язує напруги та швидкість деформації рідини для трьох напрямків, можна подати у вигляді рівнянь Нав'є-Стокса:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial z} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial v_x}{\partial z} + T_x; \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_y}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_y)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_y v_z)}{\partial z} = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \\ + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial v_y}{\partial z} + T_y; \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x v_z)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_z v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z v_z)}{\partial z} = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu_e \frac{\partial v_z}{\partial z} + T_z, \quad (2.5)$$

де g_x , g_y , g_z – компоненти вектора прискорення вільного падіння у напрямках x , y та z відповідно;

μ_e - Ефективна в'язкість;

T_x , T_y , T_z – компоненти вектора в'язких втрат у напрямках x , y та z відповідно:

$$T_x = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v_z}{\partial x}; \quad (2.6)$$

$$T_y = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v_z}{\partial y}; \quad (2.7)$$

$$T_z = \frac{\partial}{\partial x} \mu \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial y} \mu \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \mu \frac{\partial v_z}{\partial z}. \quad (2.8)$$

Ефективна в'язкість враховує ламінарну в'язкість μ (яка визначається властивостями розплаву) та турбулентну в'язкість μ_t (яка розраховується за моделлю турбулентності):

$$\mu_e = \mu + \mu_t \quad (2.9)$$

Для опису турбулентності була використана SST модель (Shear Stress Transport Model) (двошарова модель Ментера), яка поєднує в собі переваги як стандартної k - ϵ моделі, так і k - ω моделі.

Зв'язок теплоперенесення та руху рідини відображає закон збереження енергії, що подається у вигляді термічних транспортних рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p v_y T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_p v_z T)}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v; \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p v_y T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_p v_z T)}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v; \end{aligned} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho C_p T)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho C_p v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho C_p v_y T)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho C_p v_z T)}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_v, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де T – температура розплаву;

Q_v – об'ємні джерела тепла;

k – теплопровідність розплаву;

C_p – питома теплоємність розплаву.

Переходячи від запису рівнянь у приватних похідних до матричної форми, формується система рівнянь, вирішенням яких є значення компонентів вектора швидкості, тиску, температури в межах розрахункової області, що розглядається. Цей перехід виконується вбудованими алгоритмами пакета ANSYS. З урахуванням наведеної вище послідовності розробка математичної моделі витікання металу через стакани-дозатори багаторівчачої сортової МБЛЗ базувалася на наступних етапах:

На першому етапі, була створена геометрична модель розрахункової області із додаванням фізичних властивостей середовища (матеріалів) у розрахунковій галузі, та згенерована кінцево-елементна модель з подальшою дискретизацією розглянутої розрахункової області, тобто створена сітка кінцевих елементів (рисунок 2.8).

Дискретизація області включала введення числа, розмірів, та форми елементів, які використовуються для побудови звичайно елементної моделі. Елементи, пов'язані один з одним у вузлових точках (вузлах) та в сукупності апроксимують форму розрахункової області.

Цей етап немає чіткого теоретичного обґрунтування. З одного боку, розміри елементів мають бути обрані малими, щоб забезпечити точні результати. З іншого боку, застосування досить великих елементів значно скорочують процес обчислень. Тому остаточний вибір розмірів елементів проводиться, з фізичної сутності завдання.

При створенні геометричної моделі, в якості розрахункової області був взятий внутрішній обсяг калібрувальної вставки стаканів-дозаторів (верхнього, та нижнього), який був заповнений рідкою сталлю

При цьому, кінцево-елементна модель була створена окремо для об'єму проміжного ківша над сталерозливним вузлом, і окремо для об'єму металу у внутрішніх порожнинах верхнього та нижнього стакана-дозатора. У результаті було сформовано, кінцево-елементну модель розрахункової області, що містить понад 450 тис. вузлів.

Після цього, сформованій моделі було додано таких граничних умов, як зовнішніх впливів (температур, теплових потоків, сил, тощо) та закріплень на межах області.

При створенні математичної моделі були використані граничні умови, що відповідають параметрам безперервного розливання на 7 рівчаків сортової МБЛЗ (таблиця). Масову витрату на вході в модель вибирали залежно від швидкості розливання, при цьому величина інтенсивності турбулентності становила 5 %. На кожній поверхні стінки моделі використовувалися стандартні

граничні умови. Граничні умови статичного тиску приймалася на виході. Прискорення вільного падіння було прийнято рівним $9,81 \text{ м/с}^2$. Розрахунок проводився в ізотермічних умовах.

Таблиця 2.3 - Граничні умови, що відповідають параметрам безперервного розливання на 7 рівчаків сортової МБЛЗ

Параметр	Одиниці виміру	Значення	Значення	Значення	Значення
Швидкість розливання	м/м	2,95	3,0	3,1	2,95
Перетин заготовки	мм	120x120	120x120	120x120	120x120
Діаметр входу	мм	180 мм	180 мм	180 мм	180 мм
Діаметр верхнього стакана-дозатора	мм	19	20	20	21
Висота верхнього стакана-дозатора	мм	74	74	74	74
Діаметр нижнього стакана-дозатора	мм	18	17	18	16
Висота нижнього стакана-дозатора	мм	56	56	56	56
Масова витрата сталі	кг/с	4,97	4,8	5,2	4,97
Щільність рідкої сталі	кг/м ³	7000	7000	7000	7000
В'язкість рідкої сталі	кг/(м·с)	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049

На другому етапі завдяки вбудованими процедурами пакета ANSYS, було автоматично отримано кусково-безперервну функцію, яка визначена на всій розрахунковій області на основі функцій кінцевих елементів. Також було складено системи рівнянь алгебраїзму шляхом мінімізації деякої величини, пов'язаної з фізичною постановою завдання, та вирішення цієї системи щодо вузлових значень – температури у задачах теплопровідності, зрушень тощо.

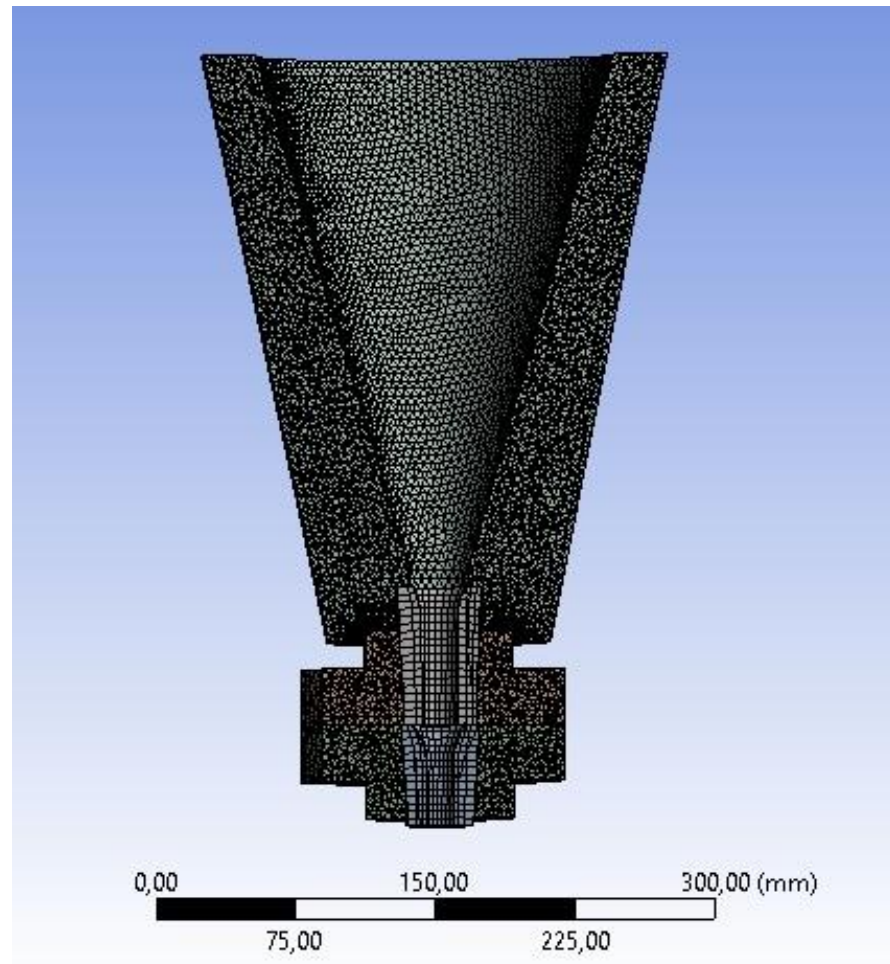


Рисунок 2.8. - Загальний вигляд кінцево-елементної моделі розрахункової області верхньої та нижнього (змінного) стакана-дозатора сортової МБЛЗ.

На заключному етапі, отримані результати розрахунку виводилися у графічній та текстовій формах (поля швидкостей, напруги, потоки тепла та ін.) для подальшого аналізу. Результатами розрахунку були значення векторів швидкості та сумарної швидкості, температури, теплового потоку, у кожній вузловій точці розрахункової області для кожного часового кроку, які можна подати у табличній та графічній формі (у вигляді векторних чи контурних) (рисунок 2.9, рисунок 2.10). У моделі також є можливість оцінювати кінетичну енергію та її дисипацію, та ефективну в'язкість розплаву, дотичні напруження та турбулентність у зоні стінок кристалізатора та стакана, тощо.

В цілому виконані на математичних моделях дослідження руху потоків металу, що розливається, через стакани-дозатори сортової МБЛЗ добре

кореспондуються з результатами, отриманими в ході фізичного моделювання. Це, перш за все, відноситься до напрямку руху основних турбулентних потоків у порожнинах цирконієвих вставок стаканів-дозаторів та їх поведінки залежно від зміни умов трансформації калібрувальної вставки (заростання, розмиття, зміна конфігурації «лійки»).

Визначення оптимальних конфігурацій цирконієвих вставок може бути виконано за допомогою математичного моделювання швидкостей в їх обсязі. Основними критеріями, які використовувалися для оптимізації, були відсутність зон підвищеної турбулентності в порожнинах «калібрувальної» вставки, що призводить до нерівномірного її зношення або заростання і як наслідок порушення компактності струменя.

В основу математичної моделі, моделювання впливу наявності та конфігурації лійки цирконієвої вставки стаканів-дозаторів лягли дві конструкції калібрувальних стаканів, представлені на рисунку 2.9 і три різних діаметри верхнього стакана-дозатора 19, 20 і 21 мм. Діаметр нижнього стакана-дозатора залишався постійним (18 мм). Таким чином, загальна кількість досліджуваних варіантів становила 6.

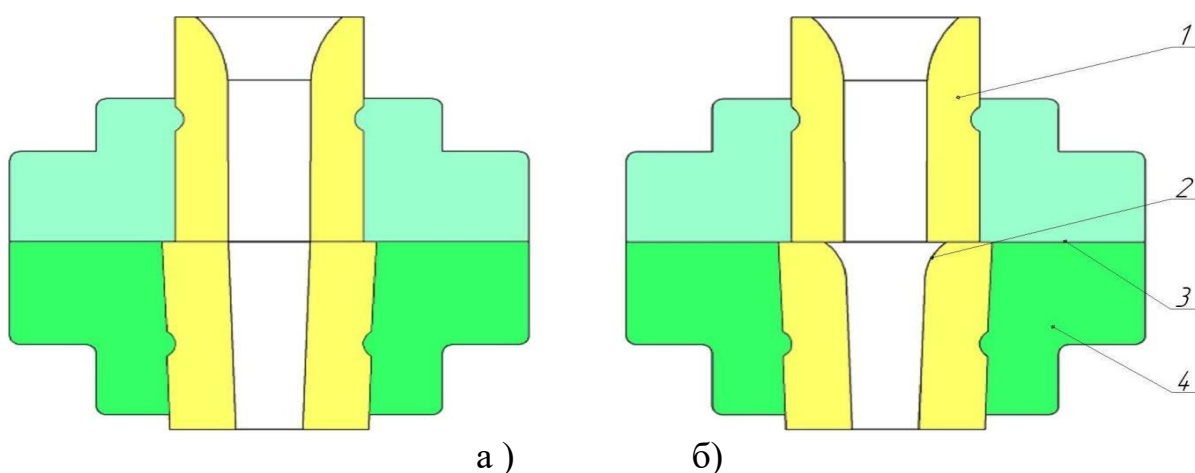


Рисунок 2.9 – Калібрувальні стакани-дозатори а) без заокруглення; б) із заокругленням: 1 – калібрувальна вставка верхнього стакана-дозатора; 2 – заокруглення сталепровідного каналу; 3 – площина ковзання; 4 – нижній стакан-дозатор.

З рисунку видно, що відмінністю геометричної форми калібрувальних стаканів представлених на рисунок 2.9 б є наявність закруглення (10 мм) у верхній частині калібрувальної вставки нижньої стакана.

Варіант з заокругленою калібрувальною вставкою з верхнім стаканом-дозатором діаметром 21 мм є прикладом ефективного використання закруглення як механізму управління потоками всередині сталерозливного каналу. В даному випадку закруглення 10 мм забезпечує плавний перехід до діаметра 18 мм нижнього стакана-дозатора. Це видно з рисунку 2.10 завдяки великому радіусу при великій різниці поперечних перерізів каналів виключається можливість утворення застійної зони. Вихрові явища в області площини ковзання також відсутні.

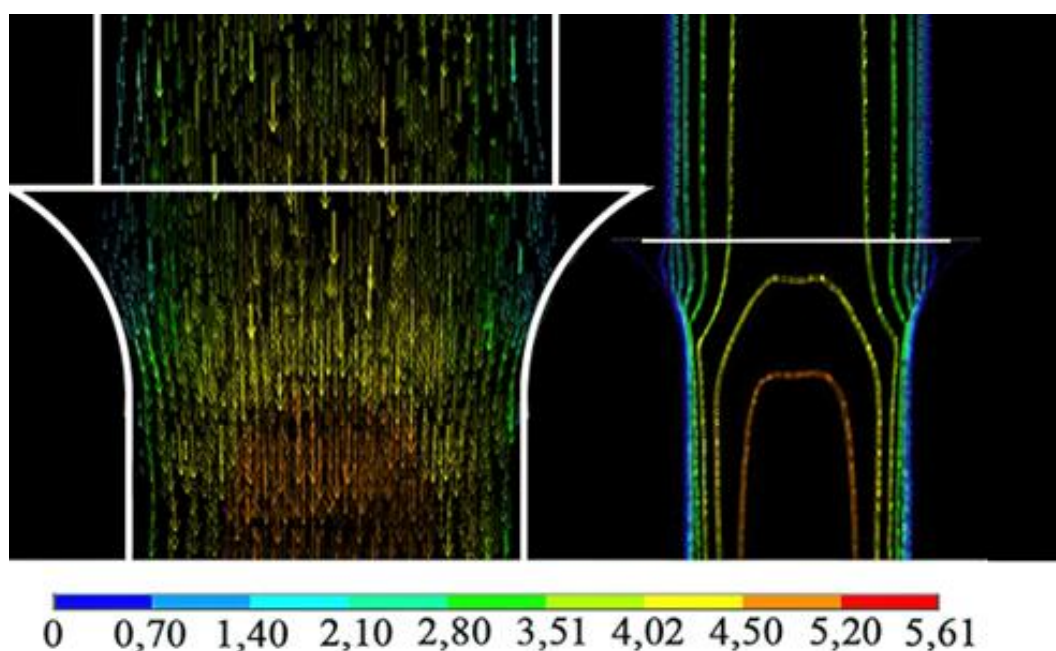


Рисунок 2.10 - Векторні діаграми швидкостей в об'ємі "калібрувального" стакана-дозатора.

Таким чином, була розроблена математична модель процесів перетікання металу з проміжного ківша в кристалізатор через сталерозливний вузол, що включає в себе, верхній (постійний) стакан-дозатор і нижній (змінний) стакан-дозатор сортової МБЛЗ. Модель дозволяє отримувати достовірну інформацію про

такі технологічні параметри рідкого металу: поле швидкостей руху розплаву; поле розподілу температури в обсязі верхнього та нижнього стакан-дозатора; поле тиску, яке створюються потоками металу в процесі витікання через «калібрувальний» отвір. Основними параметрами для досліджень були швидкість і температура металу, який надходить із проміжного ківша в сталерозливний вузол ПК; геометрія стаканів-дозаторів, включаючи внутрішні порожнини «калібрувальної» вставки.

Перевірка адекватності відтворення математичною моделлю явищ, що відбуваються у стаканах-дозаторах при високошвидкісному розливанні, виконана за даними фізичного моделювання, а також за непрямыми ознаками промислових випробувань.

Висновки по другому розділу

1. Розроблено фізичну модель, яка дозволяє виконувати комплексні дослідження за допомогою візуальних оцінок окремих стадій витікання металу через сталерозливний вузол проміжного ківша, а також імітувати процеси вікнино-утворення та руйнування футерівки проміжного ківша. Дані явища в сукупності призводять до затягування неметалевих включень в сталерозливний канал з подальшим їх осіданням на калібрувальній вставці стакан-дозатора.

2. В цілому розроблена математична модель і система обраних початкових і граничних умов повною мірою дозволяють оцінити гідродинамічний і тепловий стан розплаву при витіканні його через сталерозливний вузол проміжного ківша по ходу високошвидкісного розливання і виконати дослідження з пошуку раціональних параметрів розливання та режимів руху турбулентних потоків всередині "калібрувальних" вставок стаканів-дозаторів. Це досягається завдяки отриманню векторних картин швидкостей руху потоків розплаву на двовимірній та тримірній моделях, що дозволяють кількісно оцінювати характер переміщення рідини. 3. Основними результатами, які отримали в ході розрахунків за допомогою математичної моделі, є значення векторів швидкості та сумарної швидкості,

температури розплаву, теплового потоку в кожній вузловій точці розрахункової області для кожного часового кроку, які можна подати у табличній та графічній формі (у вигляді векторних або контурних діаграм). Також у моделі є можливість оцінити кінетичну енергію та її дисипацію, ламінарну та ефективну в'язкість розплаву, дотичні напруги та турбулентність.

4. 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 і, як, наслідок, уникнути аварійних ситуацій у ході розливання серії на МБЛЗ.

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРУ ПОВЕДІНКИ РОЗПЛАВУ ПІД ЧАС ВИСОКОШВИДКІСНОГО РОЗЛИВАННЯ СТАЛІ НА БАГАТОРІВЧАКОВИХ МБЛЗ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ШВИДКОЗМІННИХ СТАКАНІВ-ДОЗАТОРІВ

Досвід виплавки та розливання сталі на сучасних металургійних підприємствах свідчить про те, що для отримання продукції високої якості необхідно забезпечити певний рівень технологічних процесів як під час виплавки, так і на різних стадіях позапічної обробки та безперервного розливання. Одним із ключових факторів у даному аспекті є забезпечення стабільного процесу розливання на ділянці промковш - кристалізатор як у швидкісному плані з точки зору забезпечення продуктивності, так і отримання належної якості продукції за рахунок виключення факторів розливання, що призводять до дефекту заготовки.

3.1 Вивчення природи виникнення «віяла» металу в процесі високошвидкісного безперервного розливання сталі на багаторівчачкових МБЛЗ

Актуальність розробки засобів гідродинамічної стабілізації струменя металу з промковша в кристалізатор при безстопорному розливанні на сортовий МБЛЗ відкритим струменем зумовлена цілою низкою факторів. Зокрема, порушення гідродинамічної стабільності («віяла») струменя з різних причин залежно від масштабу та тривалості «віяла» призводить до припинення розливання на «віяльному» струмку з подальшим його перезапуском.

При цьому мають місце втрати продуктивності МБЛЗ через вимушене припинення розливу на «віяльному» рівчаку. При наступних перезапусках рівчаків, в силу особливостей технологічного процесу безперервного розливання сталі, виникають додаткові втрати, пов'язані з одержанням браку за «поясами» та короткими заготовками, додатковою витратою змінних дозаторів системи

швидкої зміни дозаторів («ШЗД»), зниженням стійкості мідних гільз кристалізатора, а також додатковим використанням витратних матеріалів під час перезапуску рівчаків. При витримці рівчака на жолобі для стабілізації струменя та при перезапуску з перепідготовкою рівчака зростають втрати металу у вигляді технологічних відходів (скрап аварійних ємностей, головного та хвостового обрізу заготовок).

Крім того, як показує практика, при зупинках рівчаків помітно зростає ймовірність порушення працездатності системи ЗВО, що пов'язано зі зростанням інтенсивності утворення сольових відкладень у колекторах та забруднення форсунок. При таких порушеннях (в роботі ЗВО) зростає ймовірність отримання заготовок із підвищеною кривизною та ромбічністю, що призводить до додаткових втрат у вигляді браку заготовок.

При розгляді основних конструкцій систем швидкої зміни стаканів-дозаторів було встановлено, що найбільшого поширення в Україні набула конструкція марки «CNC» фірми «Vesuvius», яка дозволяє без зупинки процесу розливання переміщати змінний стакан-дозатор з касети в робочий стан, всього за 0,2-0,3 секунд (рис. 3.1-3.2).

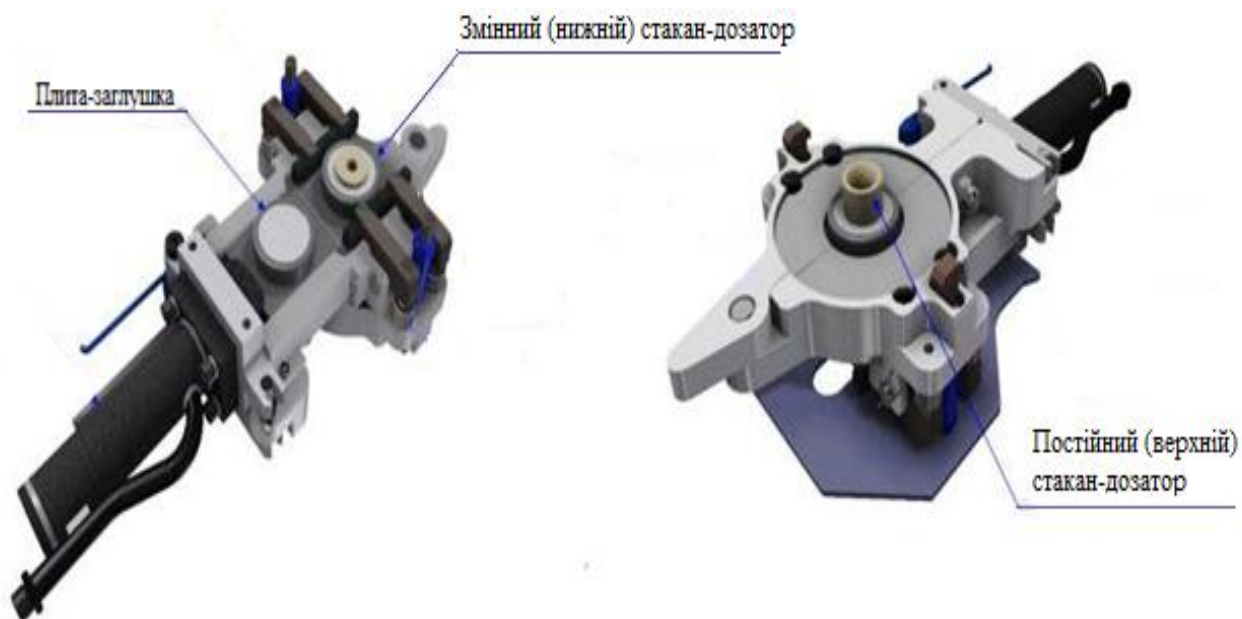


Рисунок 3.1 – Схема системи швидкої зміни стакана-дозатора



Рисунок 3.2 – Зовнішній вигляд системи швидкої зміни стаканів-дозаторів.

Зважаючи на широку поширеність даної системи було прийнято рішення покласти в основу експериментальних досліджень дисертаційної роботи саме цю модифікацію механізму швидкої зміни стаканів-дозаторів.

З метою виявлення закономірностей прояву «віяла» металу, на ПрАТ «Камет-Сталь», в ході розливання серії на МБЛЗ було проведено аналіз статистичних даних за 2019-2020р. з нагоди розливання з «віялам» струменя від різних виробничих факторів на двох сортових МБЛЗ.

У таблиці 3.1 подано статистичні дані за I кв. 2019 р. за частотним розподілом «віялових явищ» за МБЛЗ-1,3 при використанні проміжних ківшів різних типів (різної місткості), з різними схемами футерівки (короткі/довгі ківші) та серійністю (тривалістю) розливання.

Таблиця 3.1 - статистичні дані за I кв. 2019 р. за частотним розподілом «віялових явищ» на МБЛЗ-1,3

Період 2019 р.	Кількість «віял», абс./отн.		Серійність, пл./серія		Використання типів п/ківшів, %			
					МБЛЗ-1		МБЛЗ-3	
	МБЛЗ-1	МБЛЗ-3	МБЛЗ -1	МБЛЗ- 3	п/к 30т	п/к 40т	п/к 30т	п/к 40т
січень	21/0,68	70/2,69	30,5	41,9	84	16	46	54
лютий	21/0,66	41//1,86	25,9	44,4	75	25	50	50
березень	27/0,77	45/2,25	25,9	48,6	80	20	35	65
Разом I кв.	69/0,70	156/2,27	27,4	44,8	79.7	20	44	56

* - «віял» на серію

З таблиці 3.1 видно, що проявів «віялових явищ» на МБЛЗ-3 помітно більше, ніж на МБЛЗ-1, як у абсолютному (шт.), так і відносному (шт./серію) виразі – відповідно 156 проти 69 (2,26 рази) за абсолютним показником або 2,29 проти 0,70 шт./серія (у 3,27 рази) - за питомим показником.

Однією з можливих причин зазначеного зростання кількості віялових явищ є більш висока серійність розливу на МБЛЗ-3, ніж на МБЛЗ-1 – відповідно 44,8 плавок проти 27,4 плавки (в 1,63 рази).

З таблиці 3.1 також видно, що 30 т проміжні ківші на МБЛЗ-1 використовувалися частіше, ніж 40 т (80 проти 20%). У той самий час використання проміжних ківшів різних типів (30-т і 40-т) на МБЛЗ-3 було приблизно однаковим (44 і 56%). На підставі цих даних можна зробити попередній висновок про вплив конструкції проміжного ківша на частоту виникнення «віяла» відсутній.

Виконаний аналіз можливого прямого впливу фактора конструкції проміжного ківша на частоту прояву «віяла» струменя показав, що питома кількість «віял» (на серію) для різних проміжних ківшів в межах однієї МБЛЗ помітно не відрізняється, але відрізняється один від одного між різними МБЛЗ (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2 – Питомі показники прояву «віяла» МБЛЗ-1,3 для проміжних ківшів місткістю 30 і 40 т

Період 2019	МБЛЗ-1		МБЛЗ-3	
	п/к 30т	п/к 40т	п/к 30т	п/к 40т
січень	0,65	0,80	2,5	3,43
лютий	0,71	0,50	1,82	1,91
березень	0,71	1,0	1,29	2,77
Разом I кв.	0,69	0,75	1,97	2,55
	0,70		2,29	

Так, по МБЛЗ-1 вона становить (0,65-0,71)/сер.0,69 для 30 т проміжних ківшів і (0,5-1,0)/сер.0,75 «віял»/серія – для 40 т проміжних ківшів. Аналогічні показники по МБЛЗ-3 становлять (1,29-2,5)/сер.1,97 і (1,91-3,43)/сер.2,55

«віял»/серія відповідно, що помітно вище - $1,97/0,69 = 2,86$ (для 30-т п/ківша) та $2,55/0,75 = 3,4$ (для 40-т п/ківша).

Така помітна відмінність по МБЛЗ дозволяє констатувати, що:

1) фактор конструкції проміжного ківша не впливає на частоту прояву «віял» струменя;

2) є не виявлений значущий фактор впливу, що визначає зростання «віял» на МБЛЗ-3 в порівнянні з МБЛЗ-1 сумарно по 30 т і 40 т проміжним ківшем в $2,29/0,70 = 3,27$ рази в порівнянні з МБЛЗ -1.

Одним з таких можливих факторів, крім серійності, може бути відмінність по двох машин в марочного сортаменту сталі, що розливається. Нижче представлені дані за I-й квартал 2019 р. за часткою плавок з різним вмістом вуглецю в сталі (таблиця 3.3) та кількістю «віял» за найбільш показовими (за обсягами виробництва) групами марок сталі (таблиця 3.4).

Таблиця 3.3 – Частотний розподіл (%) плавок на МБЛЗ-1,3 (І кв. 2019 р.) за вмістом вуглецю в сталі

№ МБЛЗ	всього пл.	Вміст вуглецю в сталі, %			
		≤0,10	≤0,25	0,26-0,50	>0,50
МБЛЗ-1	2666	36,9	79,7	14,5	5,7
МБЛЗ-3	2990	3,4	95,1	4,9	-

З таблиці 3.3 видно, що на МБЛЗ-3 частка низьковуглецевого сортаменту вище, ніж на МБЛЗ-1, але при цьому одночасно нижча частка плавок із вмістом вуглецю ≤0,1%.

Таблиця 3.4 – Відносна кількість «віял» за марками сталі

№ МБЛЗ	Марки сталі				Усього
	SAE1006-1010, 1пс/сп	Ст3,4	Ст3,4 mod**	Марки з C>0,50%	
МБЛЗ-1	3,11/996*	2,23/987	3,70/27	3,21/156	2,72/2166
МБЛЗ-3	6,86/102	5,14/2102	5,45/679	-	5,37/2833

* - чисельник – відносний показник «віял» по групі марок (%), знаменник – кількість плавок групи;

** - із вмістом Mn>1%

З даних, поданих у таблиці 3.4, видно, що для МБЛЗ-3 показники питомого «віяла» вищі за усіма марками.

У таблиці 3.5 і рисунку 3.3 представлені дані частотного розподілу «віял» у процесі розливання серії.

Таблиця 3.5 - Розподіл «віял» по серії (дані за I кв.2019р.)

№ плавки по серії	МБЛЗ-1		МБЛЗ-3		МБЛЗ-1,3	
	шт.	%	шт.	%	шт.	%
1-15	41	59,4	65	41,7	106	47,1
16-30	13	18,8	42	26,9	55	24,4
31-45	10	14,5	26	16,7	36	16,0
46-60	5	7,2	15	9,6	20	8,9
61-75	0	0,0	8	5,1	8	3,6
<i>Усього</i>	<i>69</i>	<i>100</i>	<i>156</i>	<i>100</i>	<i>225</i>	<i>100,0</i>

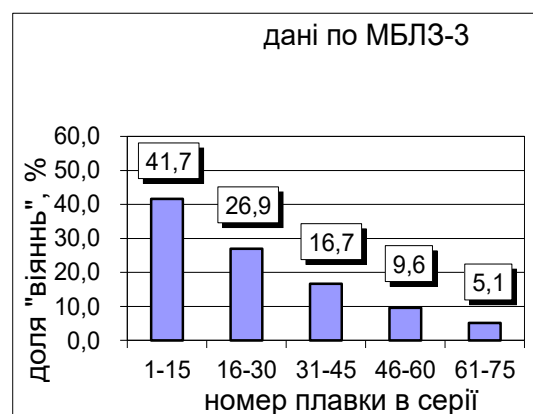
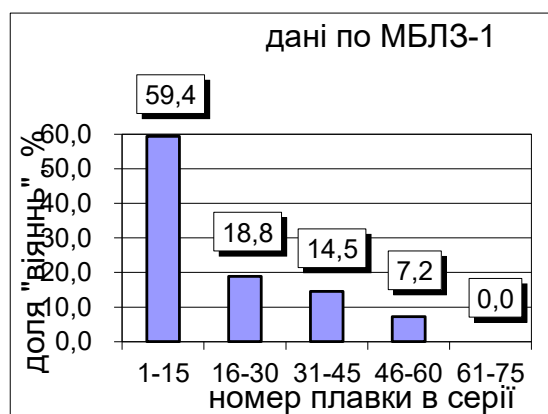


Рисунок 3.3 – Відносний розподіл «віялових явищ» по плавках для МБЛЗ-1 та МБЛЗ-3

З вище представлених даних видно, що характер розподілу «віял» в ході розливання серії, має монотонно спадаючий характер як для кожної з МБЛЗ, так і сумарно МБЛЗ 1 і 3.

З урахуванням такого характеру розподілу, а також з урахуванням вищої серійності розливання на МБЛЗ-3 порівняно з МБЛЗ-1 (44,8 проти 27,4 пл/серія або в 1,64 рази вище), питомий показник «віяла» віднесеним не до серії (2,29 проти 0,70 згідно з таблицею 3.4), а до плавки, для МБЛЗ-3 має бути вищим – $2,29/44,8 = 0,051$ «віяла»/пл. проти $0,70/27,4 = 0,026$ «віяла»/пл. чи $0,051/0,026=1,96$ разу.

Таким чином, помітна відмінність питомих показників «віяла» (шт./плавку) по МБЛЗ-1 та МБЛЗ-3 пов'язана з дією на МБЛЗ-3 нествановленого значущого фактора впливу. Таким значним чинником може, ймовірно, бути швидкість розливання. У таблиці 3.6 представлені дані щодо швидкостей розливання на МБЛЗ-1,3 у I-му кварталі 2019 р.

Таблиця 3.6 – Середні значення швидкості розливання металу (м/хв) за МБЛЗ-1,3

Період 2019р.	січень	лютий	Березень	I квартал
МБЛЗ-1	2,99	2,93	2,92	2,95
МБЛЗ-3	3,42	3,35	3,30	3,36
ΔV , м/хв	0,43	0,42	0,38	0,41

За даними, наведеними в таблиці 3.6, випливає, що середня швидкість розливання в I кварталі. 2019 р. на МБЛЗ-3 становила 3,36 м/хв, а на МБЛЗ-1 – 2,95 м/хв (що у $3,36/2,95 = 1,14$ рази вище). З цього випливає, що при зростанні швидкості на 14% кількість «віял» збільшилася в 1,96 раза. Це вказує на сильну та нелінійну (статичну) залежність «віяла» від швидкості розливання. Зі зростанням швидкості розливання збільшується інтенсивність гідродинамічних потоків у проміжному ківші та рівень турбулентності в них і, як наслідок, зростає ймовірність «віяла» струменя металу при його витіканні на ділянці стакан-дозатор – кристалізатор. Також можна відзначити, що максимальні швидкості розливання МБЛЗ-1 становлять 3,5 м/хв, а по МБЛЗ-3 - 4,0 м/хв.

Дані щодо частотного розподілу «віяла» по рівчакках, наведені на рисунку 3.4, є підтвердженням раніше передбачуваного механізму впливу гідродинамічних потоків та рівень турбулентності на виникнення «віяла» в ході розливання на центральних рівчакках Р3-5 де інтенсивність струменево-циркуляційних потоків струменя з сталерозливного ківша максимальна, частота випадків «віяла» металу також максимальна. Мінімум проявів «віяльних явищ» посідає «середні» рівчакки Р2,6. Деяке підвищення частоти «віял» по крайніх рівчакках Р1,7 пояснюється додатковим закручуванням та несиметричністю потоків поблизу торців промковша.

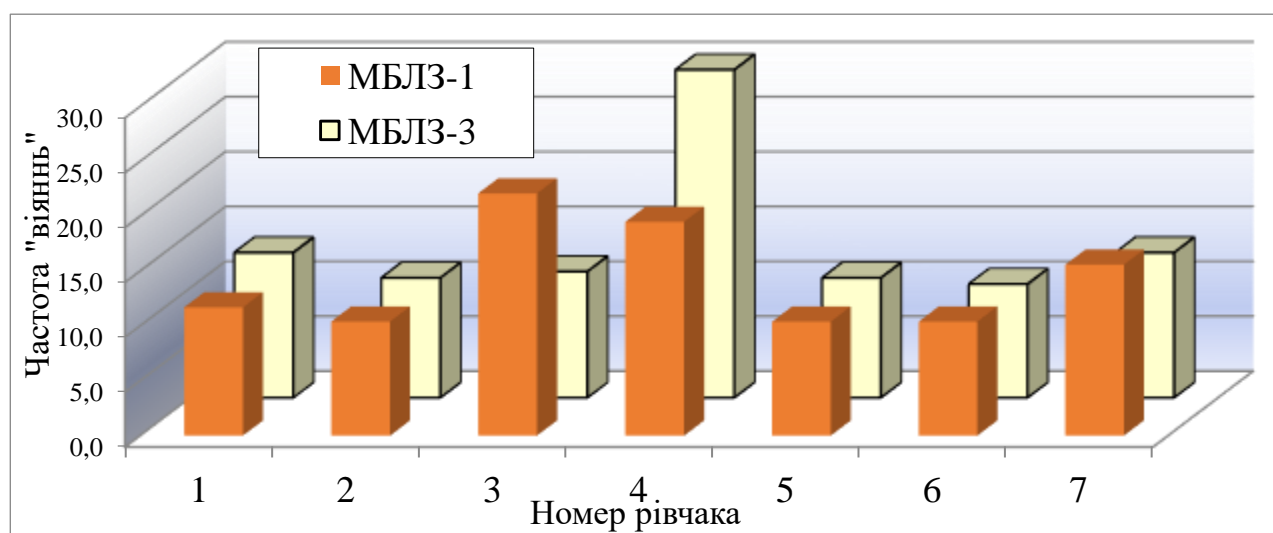


Рисунок 3.4 - Частотний розподіл «віял» по рівчакках МБЛЗ-1,3

Представлені на рисунку 3.5 статистичні дані за I кв. 2019 р. за частотним розподілом «віял» по ходу плавки також відповідають припущенню про вплив на них турбулентного руху металу. Максимальна частота «віял» струменя металу припадає на період після відкриття шибера сталерозливного ківша, коли рівень металу в ньому максимальний ($\approx 40\%$ випадків у перші 10 хвилин). У цей період у проміжному ківші забезпечується набір рівня металу до номінального значення «повним» струменем зі сталерозливного ківша і, відповідно, з максимальною

витратою. Інтенсивність вторинних потоків та ступінь їхньої турбулентності в цей період максимальна.

У наступні 2 періоди (11-20) та (21-30) хв. частота «віял» знижується до показника (16-25)/сер. 21,5%, а період (31-40) хв. - До (10-17) / сер.12%. Є підстави вважати, що ці «віяла» обумовлені гідродинамічними збуреннями, що виникають при виконанні вимірювання температури (мінімум 2 вимірювання на плавку) і відборі проб металу (2 проби), що припадають на період (11-40) хв.

Деяке зменшення частоти «віяла» по відношенню до періоду (0-10) хв. зумовлено зниженням лінійної швидкості (постійність масової швидкості забезпечується поступовим відкриттям шиберного затвора сталерозливного ківша) витікання струменя металу зі сталерозливного ківша через падіння рівня металу в ньому, наявністю фактору повного проміжного ківша, а також локальним і короткочасним характером збурень під час замірів температури та відбору проб металу.

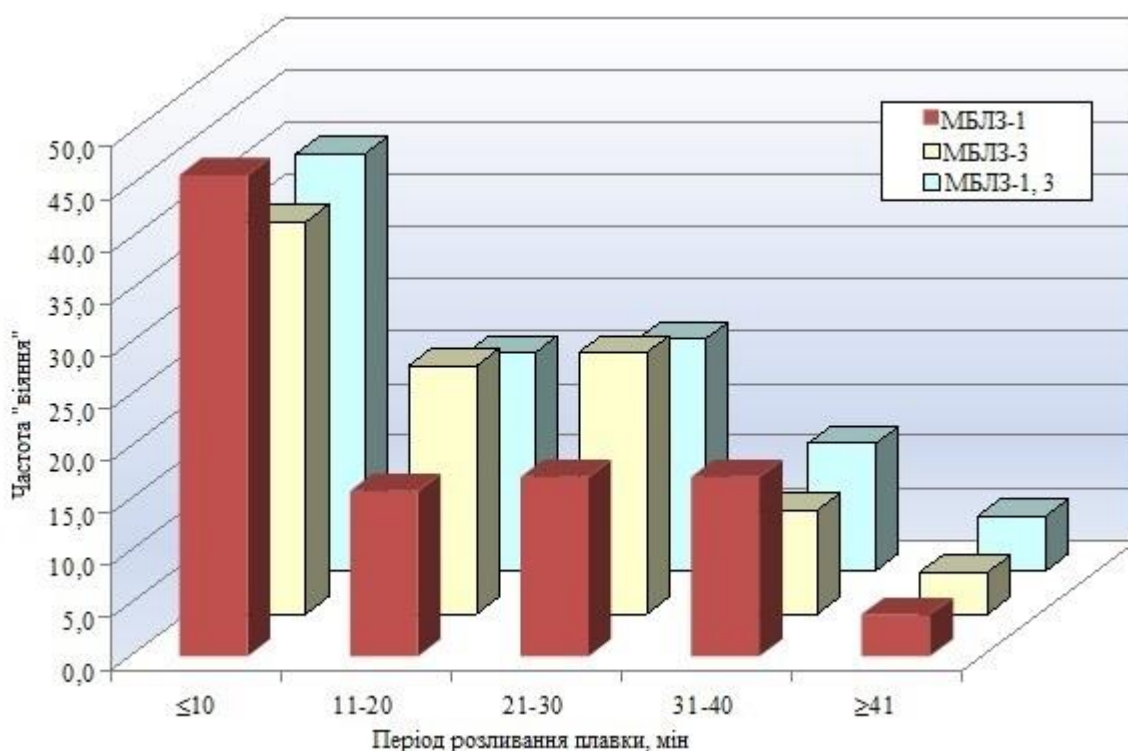


Рисунок 3.5 – Частотний розподіл «віял» за тривалістю розливання плавки

Отже, у результаті статистичного аналізу різних чинників, зокрема, технологічних, визначено найбільш значущі фактори впливу на «віяла» струменя. До них відносяться швидкість та серійність розливання. Розподіл «віял» по серії, має монотонно спадний характер, що пов'язано з роллю футерівки проміжного ківша і обумовлено збільшенням товщини спеченого шару футерівки і, відповідно, зниженням ймовірності «віяла» через її термомеханічну ерозію. Частотний розподіл «віял» залежно від номера рівчака показує, що мінімум «віял» припадає на середні рівчаки Р2,6, а максимум – на центральні рівчаки Р3-5, що пов'язане з різницею інтенсивності примусових потоків.

Частотний розподіл «віял» залежно від часу з моменту відкриття шиберного 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 металу. У період 20-40 хв. «віяла» пов'язані з турбулентністю, що обумовлені вимірами температури та відбором проб металу. Деяке зниження частоти «віяла» в період (31-40) хв. зумовлено зниженням температури і, як наслідок, рідкоплинності розплаву. Фактор марочного сортаменту та конструкції проміжного ківша не надає помітного впливу на «віяла» струменя.

На підставі виконаного аналізу можна також зробити висновок, що при реалізації стратегії максимально можливого підвищення швидкостей розливання металу відкритим струменем, для збільшення продуктивності МБЛЗ, проблема «віяла» струменя, з урахуванням сильного та нелінійного характеру впливу швидкості розливання на частоту «віяла», без подальшого вивчення питання, та розробки відповідних технологічних заходів лише посилюватиметься. Як наслідок, це призводитиме до зниження техніко-економічної ефективності виробництва МБЛЗ. З метою подальшого вивчення проблематики виникнення «віялових» явищ у процесі розливання серії металу було прийнято рішення

провести додатково 2 дослідження. Перше дослідження спрямоване на вивчення впливу зношування футерівки на процес утворення «віялових явищ» у ході розливання серії металу на МБЛЗ. Друге дослідження спрямоване на вивчення питання вікнино-утворення у проміжному ківші, що призводить до затягування неметалевих включень у порожнину стаканів-дозаторів, їх заростання та, як наслідок, утворення «віяла» струменя металу.

3.2 Дослідження характеру руйнування типових зон зносу футерівки проміжного ківша внаслідок руху циркуляційних потоків, що сприяють заростанню стакана-дозатора неметалевими включеннями

Останніми роками, коли вітчизняні виробники сталі гостро ставлять питання збільшення серійності розливання на МБЛЗ безпосередньо з одного проміжного ківша, що робить акцент на збільшення продуктивності.

У зв'язку з цим, особлива відповідальність з метою забезпечення необхідної тривалості розливання покладається на проміжний ківш. Експлуатаційна стійкість футерівки останнього є одним з основних факторів, що лімітують розливання сортової заготовки наддовгими серіями. Необхідно виділити такі функціональні особливості розливання наддовгими серіями:

- струмінь металу, що падає зі сталерозливного ківша, має високу кінетичну енергію, має постійний контакт з певною частиною днища проміжного ківша, що, безумовно, призводить до прискореного зносу робочого шару футерівки в місці падіння струменя;

- багаторазова періодична зміна рівня металу в проміжному ківші (при перековшуванні) змінює динаміку руху потоків сталі, має негативний вплив на стійкість робочого торкрет-покриття футерівки та «бійного» місця проміжного ківша, а також на якість готової продукції через затягування у воронки, що утворюються, неметалевих включень покривного шлаку;

- забезпечення мінімального значення різниці температур сталі, що витікає з середніх і крайніх рівчаків.

В ході вивчення основних причин виникнення «віялових явищ» струменя металу в процесі розливання, особлива увага приділялася вогнетривким елементам проміжного ківша, руйнування яких може призводити до «віяла» металу при його витіканні в кристалізатор. В результаті аналізу було встановлено, що однією з найпоширеніших причин виникнення «стартових віял» струменя, є попадання в канал дозатора продуктів руйнування футерівки промковша, а саме набивної маси, що формує воронку в розливних вузлах, над верхнім дозатором, та робочого торкрет-покриття (рисунок 3.6).

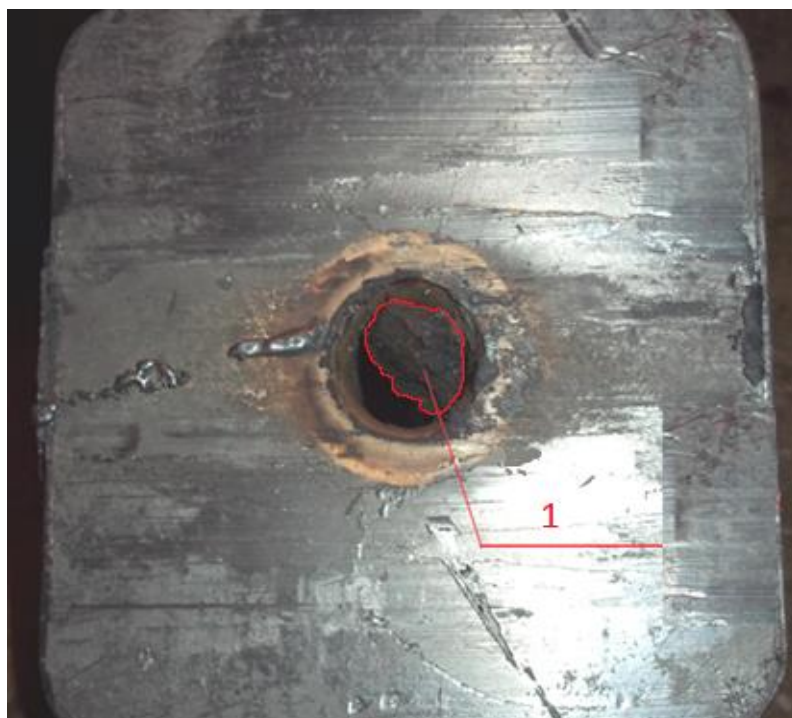


Рисунок 3.6 – Стакан-дозатор, відібраний з «віялового» струмка із фрагментом футерівки в розливному каналі: 1- фрагмент футерівки в порожнині «калібрувальної» вставки

Для «стартових віял», характерних для перших плавок у серії, екзогенні неметалеві включення, що спостерігаються в каналах дозаторів, мають вигляд відносно пухких, частково заметалених фрагментів футерівки, що відшарувалися

(торкрет або набивної маси з розливного вузла), нерідко зі шароподібними включеннями заліза (рисунок 3.7).



Рисунок 3.7 – Витягнутий з каналу стакана-дозатора фрагмент футерівки з виділеннями краплеподібних включень сталі

Таблиця 3.7 – Хімічний аналіз неметалевих включень зі стаканів-дозаторів, на яких було виявлено «віяльні» струмені металу

Зразки НВ із каналів дозаторів		MgO	SiO ₂	CaO	Feзаг.	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
Торкрет - маси марок	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 сушіння при 150 °C

З таблиці 3.7 слід, що переважання MgO у складі виявлених неметалевих включень відібраних із порожнин стаканів-дозаторів підтверджують зазначене вище їхнє походження з вогнетривких матеріалів.

Важливим моментом є та обставина, що затягування зазначених фрагментів футерівки що мають у порівнянні з рідкою сталлю більш ніж у 2 рази меншу щільність, в канал дозатора (таблиця 3.7) відбувається внаслідок динамічного впливу на них потоків металу. Щодо ерозії набивної маси, з якої формується лійка розливного вузла, найбільш ймовірною її причиною зносу є використання кисню для відкриття ривчаків. Також у ряді випадків після розливання 30-40 плавки

серії на рівчачах, де було зафіксовано «віяло» металу, було встановлено попадання в канал дозатора нижньої стакана-дозатора фрагментів руйнування дозуючої ZrO_2 -вставки верхнього дозатора (рисунок 3.8).

Є підстави вважати, що руйнування ZrO_2 -вставки починається з тієї її частини, яка виступає з масиву формованого вогнетриву дозатора, укладеного в обичайку, і зумовлено, як і у разі ерозії набивної маси, що оточує виступаючу частину вставки, використанням кисню для запуску рівчаків на стартах та перезапуску рівчаків.

При контакті з реакційною зоною струменя кисню вогнетриви зазнають інтенсивного термічного та фізико-хімічного впливу, у них виникають значні градієнти температур, що призводять до локальних руйнувань вогнетривів.

Для зниження «віяла» через попадання в канал нижнього дозатора продуктів руйнування ZrO_2 -вставки верхнього дозатора внаслідок її розтріскування при використанні кисню на запуску та перезапуску рівчаків необхідно використання посиленої конструкції верхнього (незмінного) дозатора.

Зважаючи на відсутність інструментарію з недопущення випадків пропалювання сталерозливного отвору на ділянці верхній-нижній стакан-дозатор, та виключення цього фактору утворення «віяла», подальше дослідження було спрямоване на дослідження типових зон футерівки проміжного ківша .



Рисунок 3.8 – Вид змінного стакана-дозатора із фрагментами зруйнованої ZrO_2 -вставки верхнього стакана-дозатора (а) вилучені з каналу дозатора фрагменти зруйнованої ZrO_2 -вставки (б).

На підставі вищевикладеного, з метою вивчення та аналізу впливу зносу типових зон футерівки проміжного ківша, а також залежність цього зносу від турбулентного переміщення металу від «бійного» місця до периферійних стінок промковша на виникнення «віялових явищ» при витіканні струменя металу, було вивчено й проаналізовано на моделі за допомогою розміщення експериментальних зразків (рисунок 3.9) у різні зони проміжного ківша та імітації розливання впродовж 15 хвилин. За цей час зразки зазнали різних ступенів зносу, результати експерименту наведено в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 - Експериментальні дані дослідження зносу футерівки в різних зонах промковша

Номер зразка	Локалізація	Початкова товщина, мм	Кінцева товщина, мм	Максимальне зношування, мм
1 (Рис 3.9, А)	Між периферичною стінкою та першим рівчаком	16,0	14,0	9,0
2 (Рис 3.0, Б)	Між п'ятим і шостим рівчаками	16,0	14,5	9,0
3 (Рис 3.9, В)	На рівні наливу металу промковша *	16,0	15,5	0,7
4 (Рис 3.9, Г)	На передній стінці "дельти"	16,0	12,0	6,0
5 (Рис 3.9, Д)	«Бійне» місце	16,0	8,5	5,0
6 (Рис 3.9, Е)	Між третім та четвертим рівчаками	16,0	14,0	1,0

** Результати дослідження за цим зразком недостатньо точні, враховуючи склад відтворення агресивного середовища, що імітує зону шлакового пояса.

Перші два зразки (рисунок 3.9, а і 3.9 б) були розташовані в безпосередній близькості від бічних стінок проміжного ківша і, що примітно, зона розмиву розташована саме з боку периферичних стінок. Третій зразок практично не був розмитий, рівно, як і четвертий (рис 3.9 в, і 3.9 г). Випробний зразок під номером 5 (рис 3.9, д) піддався найбільшому впливу за рахунок дії на нього кінетичної енергія падаючого струменя.

Зразок № 6, укріплений до передньої стінки «дельти», був схильний до впливу струменя, який рухається від бійного місця. Про це свідчить поздовжнє вимивання зразка.

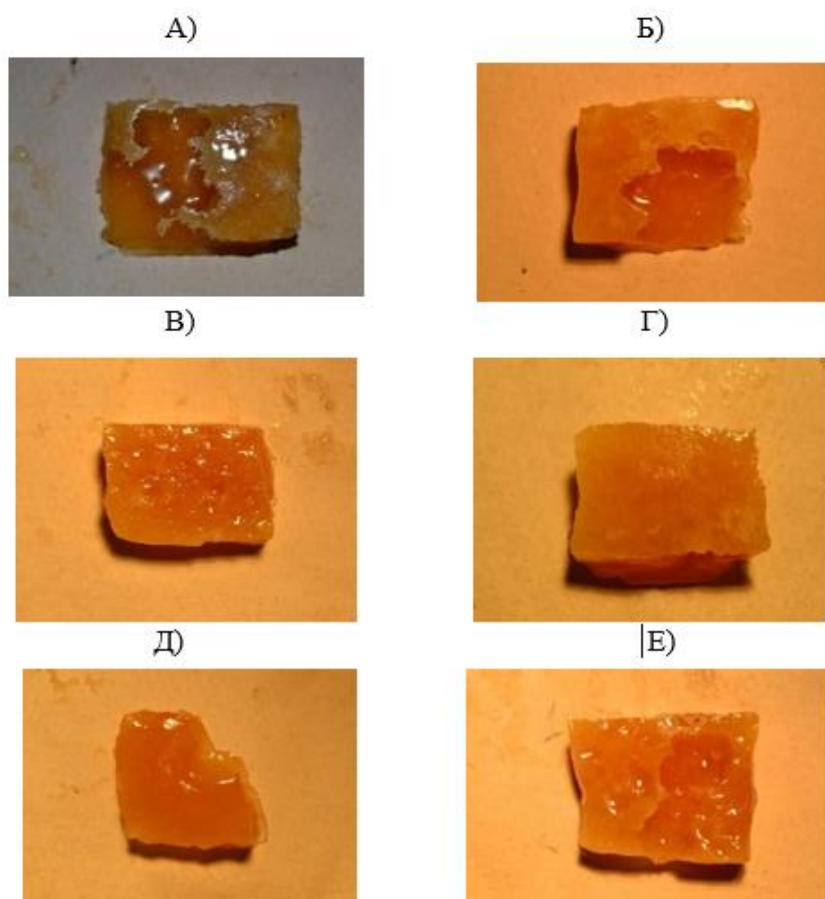


Рисунок 3.9 - Зразки імітаторів футерівки після 15 хвилин розливання

Щоб точніше визначити зношування футерівки зразки, виготовлені з інверсного цукру та желатину, були зважені до початку дослідження і після нього. Результати вимірювань наведено у таблиці 3.10.

Відносну зміну маси можна обчислити за такою формулою:

$$\Delta m = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100\% \quad (3.1),$$

де m_1 - маса випробовуваного зразка до проведення експерименту;

m_2 – маса випробовуваного зразка після проведення експерименту.

Таблиця 3.10 - Експериментальні дані дослідження щодо зміни маси зразків, які імітували футерівку.

Номер зразка	Маса до експерименту, г	Маса після експерименту, г	Відносна зміна маси, %
1	73	46	36,99
2	71	45	36,62
3	75	69	8,00
4	73	54	26,03
5	75	31	58,67
6	73	68	6,85

Результати таблиці 3.10 свідчать про те, що найбільш руйнівного впливу зазнали зразки, локалізовані безпосередньо на «бійному» місці, передній стінці дельти і біля крайніх рівчаків.

Дослідження на холодній моделі, спрямоване на вивчення зносу елементів футерівки проміжного ківша внаслідок руху потоків, здійснювалося ще й методом введення кольорової рідини в проміжний ківш, що надходить зі сталерозливного ківша, при імітації повного відкриття шиберного затвора. Швидкість і характер руху рідини, що надходить зі сталерозливного ківша, можна візуалізувати за допомогою наведеної кінограми (рис. 3.10). Це дало змогу візуально оцінити вплив потоків на ті ж зони проміжного ківша, в які були поміщені зразки.

Стрілка на сороковій секунді кінограми показує рух потоків рідини після того, як вона досягає бічних стін проміжного ківша. Візуалізація потоків, відображених на кінограмі, дає можливість спостерігати причини розмивання зразків саме з боку протилежного до місця падіння струменя.

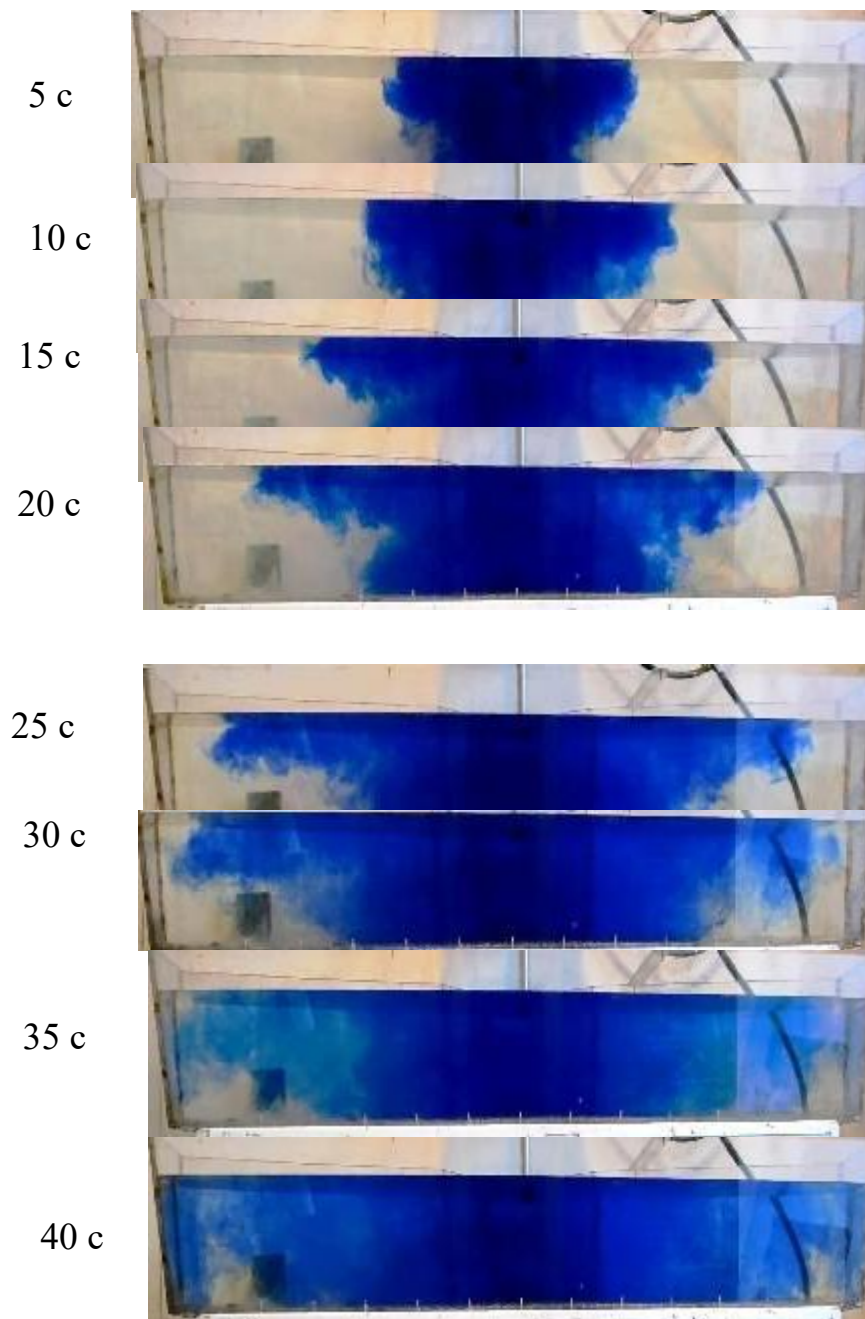


Рисунок 3.10 – Динаміка поширення циркуляційних потоків підфарбованої рідини у 7-ми рівчаковому проміжному ківші при безперервному розливанні

В ході холодного моделювання було встановлено, що однією з причин «віяла» струменя металу, є перенесення турбулентних вихрових структур різного масштабу, згенерованих у проміжному ківші, з об'єму проміжного ківша у канал стакан-дозатора. Це призводить до інтенсивної деформації зовнішніх меж та порушення суцільності відкритого струменя при витіканні металу з нижнього стакан-дозатора в кристалізатор. Даний вид «віял» найбільш важко усунути, оскільки природа їх виникнення досить складна, а розробка ефективних інструментів щодо їх запобігання потребує знання закономірностей вікнино-утворення

Турбулізація потоків та вікнино-утворення обумовлено взаємодією струменя металу зі стальковша, що має високу кінетичну енергію, з об'ємом металу в промківші. Зростання ступеня турбулентності відбувається зі збільшенням градієнтів швидкості потоків і помітно зростає за імпульсних режимів витікання. Такий режим має місце при відкриттях стальковша під час серійного розливання.

Для зниження «віяла» з цієї причини використовується локалізація високотурбулентної зони в металоприймачі промковша за допомогою «турбостопів» різної конструкції.

Як відомо, останнім часом як стабілізатор і координатор потоків виступають металоприймачі різної форми і розмірів. Параметри металоприймачів залежать насамперед від конструкції проміжного ківша та положення струменя металу по відношенню до нього. Основні функціональні призначення металоприймача полягають у наступному:

- забезпечити гасіння швидкості падаючого зі сталерозливного ківша струменя металу;
- забезпечити максимальну ламінарність потоків сталі, наближених до бокових стінок проміжного ківша ;
- Забезпечити достатню зносостійкість для забезпечення стійкості всієї системи;

– рівномірний розподіл потоків рідкої сталі по рівчакам.

Концепція створення такого вогнетривкого виробу розвивалася багатьма вогнетривкими фірмами, про що свідчить велика різноманітність патентів та наукових статей [198-204]. Враховуючи конструкційні та технологічні особливості, сучасні металопріймачі можна розділити на два основні типи: «турбостоп» (рисунок 3.11) та «колодязь» (рисунок 3.12).

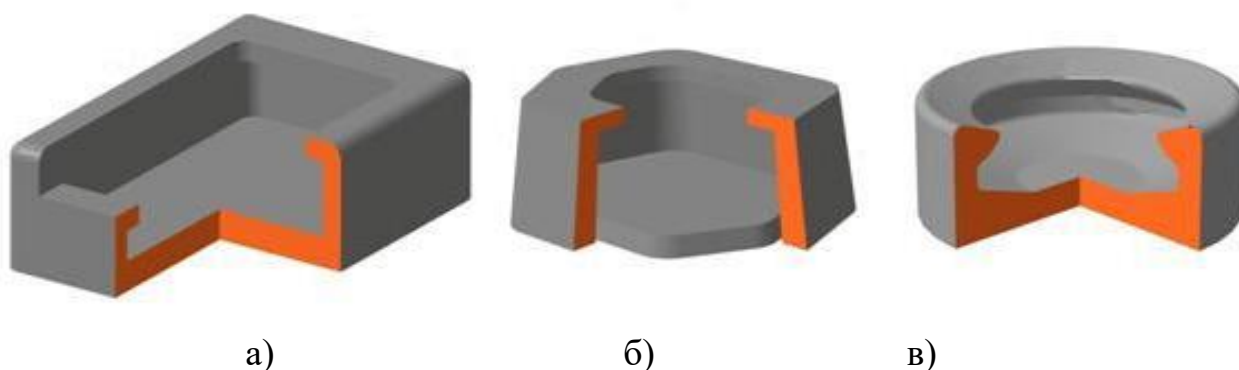


Рисунок 3.11 – Металопріймачі типу «турбостоп» різних фірм виробників: а) «Foseco»; б) "Calderys"; в) "RHI".

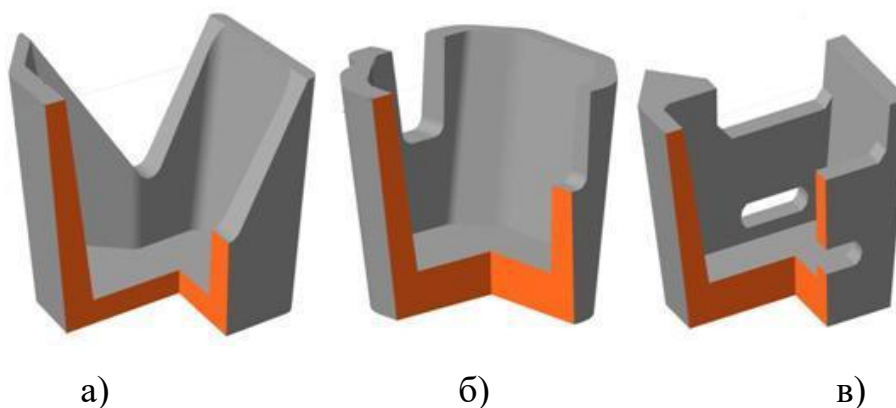


Рисунок 3.12 – Металопріймачі типу «колодязь» різних фірм виробників: а) «Dalmond»; б) "Calderys"; в) "Corvintek".

Металопріймачі типу «турбостоп» виконують роль уловлювача струменя металу, що падає зі сталерозливного ківша, і забезпечують його максимальне гальмування. Конструкція робочої камери такого типу обмежує зону прийому

сталі і завдяки закругленим боковим стінкам створює гідродинамічну «подушку», яка значно знижує енергію потоку металу і примусово спрямовує сталь вгору. Незважаючи на численні переваги, металоприймачі типу «турбостоп» не можуть забезпечити ефективний захист футерівки в зоні шлакового поясу, що значною мірою обмежує серійність розливання.

Альтернативним варіантом, в аспекті захисту шлакового поясу і підвищення експлуатаційного ресурсу футерівки проміжного ківша є металоприймачі типу "колодязь". Як правило, такі металоприймачі використовують для промківшів багаторівчачових сортових МБЛЗ при розливанні відкритим струменем [205]. Існує безліч конструктивних виконань такого металоприймача. Усі вони забезпечують максимальний захист стінок і днища промковша від негативного впливу конвективних потоків завдяки гальмуванню падаючого струменя, а також завдяки наявності вирізів (вікон) у верхній частині (рисунок 3.12, а, б) металоприймача, або випускних отворів у корпусі (рисунок 3.12, в), які рівномірно розподіляють рідкий метал по рівчачах МБЛЗ.

Узагальнюючи відомі дослідження [206-211, 52], слід підкреслити, що раціональний вибір конструкції та розташування керуючих елементів (продувних блоків, перегородок, металоприймача та ін), що встановлюються в проміжному ківші, забезпечує наступні переваги: покращення якості безперервнолитої заготовки за рахунок видалення неметалевих включень із сталі; підвищення стійкості футерівки проміжного ківша та зниження питомих витрат на розлив; підвищення серійності розливу з одного проміжного ківша при забезпеченні стабільності лиття протягом усього циклу; запобігання заростанню сталепровідного каналу стакан-дозатора, шибєрного затвора або занурювальної стакан.

Тим часом застосування металоприймачів, перегородок та продувних систем у проміжному ківші передбачає адаптацію їх конструкції до конкретних умов розливання та конструкцій проміжного ківша, яка може бути досягнута

виключно на базі глибоких практичних та аналітичних досліджень, яким присвячені численні праці дослідників по всьому світу. та українських вчених.

Однак зазначені заходи проблему «віял» з цієї причини вирішують лише частково. Почасти це пов'язано з деякими недоробками в конструкціях існуючих «турбостопів», які не враховують закономірності вікнино-утворення. Таким чином, оцінка факторів, що призводять до «віяла» струменя внаслідок присутності в об'ємі промковша турбулентних вихрових структур, показує, що потрібні додаткові технічні рішення, спрямовані не тільки на зниження інтенсивності турбулентності в обсязі проміжного ківша, але і на запобігання перенесення цих структур в метал канали. Зважаючи на це, подальші дослідження даної дисертаційної роботи будуть спрямовані на вивчення вікнино-іподібних явищ при переливі металу з проміжного ківша в кристалізатор у процесі безперервного розливання сталі.

3.3. Дослідження утворення вікнино-подібних явищ при переливанні металу з проміжного ківша в кристалізатор у процесі безперервного розливанні сталі

Відомо, що якість безперервнолітої заготовки і стабільність процесу розливання сталі великою мірою залежить від організації перетікання металу з проміжного ківша кристалізатор. Цей фактор стає особливо важливим при розливанні металу наддовгими серіями, коли безпосередньо в процесі розливання без зупинки МБЛЗ змінюють сталерозливний ківш попередньої плавки, яку вже розлили, на ківш з металом наступної плавки. У цьому випадку для продовження роботи МБЛЗ потрібен деякий час, необхідний для зміни сталерозливних ківшів. При неминучому падінні рівня металу в проміжному ківші можливе утворення вихрових вікнин, що в свою чергу може призвести до затягування холодного повітря з атмосфери, покривного шлаку та частинок вогнетривів, зруйнованих у процесі експлуатації у канали стакана-дозатора. В подальшому це призведе до

утворення на поверхні стакана-дозатора настилів, що може сприяти вторинному окисненню металу та збільшенню вмісту неметалевих включень у готовому металі. Падіння рівня металу також є небезпечним і на виробництвах, де технології передбачається використання стаціонарних вогнетривких стартових воронок.

У цих умовах доцільно докладніше вивчити процес утворення вікнин при падінні рівня металу в проміжному ківші. Утворення вікнин при витіканні рідини, з якої ємності досить добре описано в літературі.

Довгий час вважалося (акад. Д. П. Граве), що причиною утворення обертального руху частинок рідини при її витіканні через отвір у донній частині резервуара є сила Коріоліса, що виникає внаслідок дії обертання землі. Отже, у північній півкулі обертання вир завжди має відбуватися проти годинникової стрілки.

Однак численні дослідження показують, що обертання вікнин у північній півкулі виникає також і в напрямку, що збігається з рухом годинникової стрілки. Крім того, при збереженні симетричного, точно радіального перетікання рідини до отвору обертання рідини в посудині над отвором немає навіть при дуже малих напорах.

Зазначається, що сила Коріоліса, пов'язана з обертанням землі, не може викликати вікнин у рідині внаслідок своєї незначної величини в порівнянні з інерційними силами в рідині, навіть при малих швидкостях її руху. Обурення, спричинені коріолісовою силою, повинні швидко «глохнути» у в'язкій рідині. Найчастіше зазначені міркування правильні.

Вважається, що вікнини мають вихрове походження та їх інтенсивність залежить від інтенсивності вихрових шнурів, що підходять до донного отвору від джерел вікнино-утворення.

У цій роботі за допомогою фізичної моделі проміжного ківша сортової МБЛЗ, схема якої наведена на рис.2.3, були проведені дослідження процесу

зародження та розвитку вікнинного вихору. З цією метою, в різні точки моделі вводили барвник, що дозволяє спостерігати рух вихрових ниток.

Вихрові нитки, що надходять у отвори, рухаються так, що їхня верхня частина впирається у вільну поверхню, а нижня - у дно моделі. В отворі верхня частина затримується, а нижня переходить на внутрішню стінку сталерозливного каналу (рис . 3.13 а) і переміщається вниз. Дифузуючи, вихрова нитка одночасно збільшується. Однак ще до того, як напруга першого вихору значно зменшиться, підходить другий вихор, потім третій і т. д. Верхні частини вихрових ниток залишаються на поверхні, а нижні переміщуються вниз (рис . 3.13 б). В результаті осі утворюється вихровий шнур, напруженість якого достатня для створення глибокої повітряної порожнини у формі воронки, іноді проникає крізь всієї глибини потоку (рис .3.13, в).

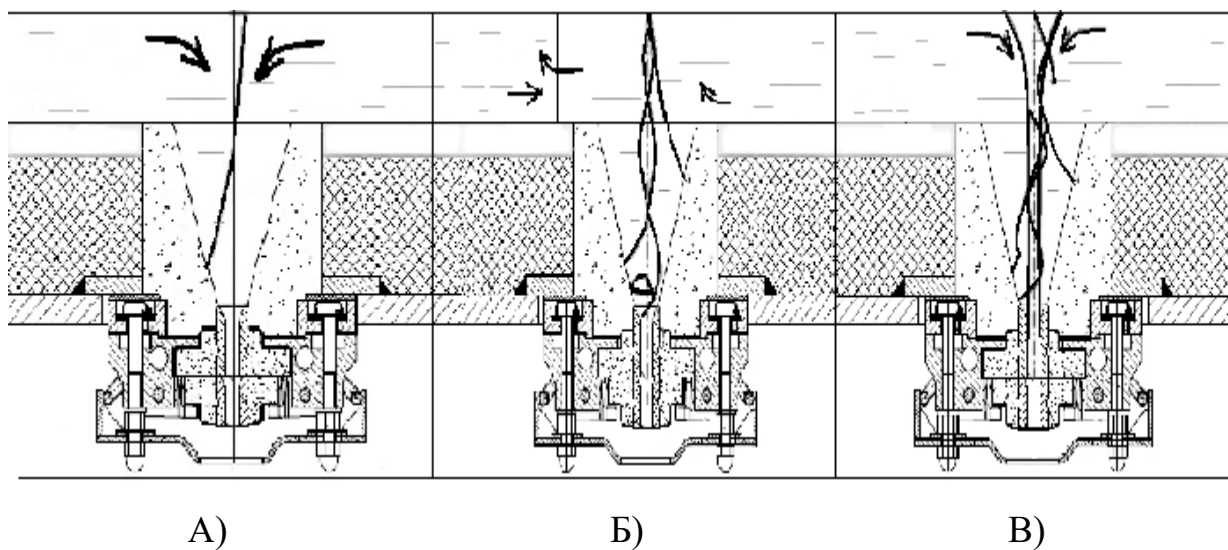


Рисунок 3.13-Механізм утворення вихрової вікнини

У такому разі верхні кінці вихорів не затримуються в осі, а переміщуються вниз спірально поверхнею вікнини В силу того, що циркуляційні швидкості до осі вирви збільшуються, верхні та нижні частини (кінці) ниток обертаються з різними швидкостями, що викликає навивки вихорів на повітряну трубку вирви. Переміщаючись вниз, вихрова нитка змінює вільну поверхню вікнини,

повідомляючи їй форму, схожу на штопор. При розвиненій вікнини дифузія вихорів відбувається не тільки внаслідок подовження вихрових ниток, але і в результаті підсмоктування їх в отвір сталерозливного вузла. З деякого моменту осьовий вихор набуває стаціонарного характеру, при якому знову відповідні нитки компенсують його дифузію за період між вихорами ланцюжка.

Стосовно питань стабільності вирви, слід зазначити, що після повного витікання збуреної рідини, яка підійшла до місця розливу (витікання), може відновитися стійка радіальна течія.

При малих швидкостях течії на характер вікнино-утворення істотно впливає поверхневий натяг. Це підтверджується дослідями, в яких поверхнево-активна плівка чужорідної рідини перешкоджала розвитку вікнин.

Виникнення вікнин-вихору при низькому рівні рідини через доний отвір може бути наслідком поступового накопичення в масі рідини значного моменту кількості руху в результаті впливу на потік протягом деякого часу невеликих сил, що її збурюють.

Незначний імпульсний момент на межах потоку може визначити характер витоку реальної рідини. Такий момент може створитися, наприклад, внаслідок несиметричного розташування отвору розливу (стакан-дозатора) щодо граничних стінок, наявності в області протікання рідини (проміжному ківші) перегородок.

Отримана при вісесиметричному витіканні вікнина без обертання, у міру зростання витрати проходить послідовно через три фази. Перша фаза характеризується лише трохи помітним зниженням вільної поверхні до осі отвору. Друга фаза характеризується виникненням над отвором зниження рівня у формі вікнини з горизонтальною площиною над отвором та утворенням під цією площиною усередині потоку об'єму, який має форму коноїди обертання. Маса рідини, укладена у зазначеному коноїдальному обсязі, не бере участі в загальному русі потоку, обтікає коноїд і виходить із резервуару через донний отвір. Усередині коноїду рідина повільно обертається у тому чи іншому напрямку. Нерідко в ньому

виникають два вихори протилежних знаків. Третя фаза - це витікання з вікниною яка пронизує всю товщу рідини.

Наголошується, що переріз вихрової трубки ніде не може стати рівним нулю, тому що в цьому випадку швидкість обертання частинок повинна стати нескінченно великою, що фізично неможливо. Вихрові трубки, до яких відносяться вікнини, не можуть закінчуватися всередині рідини: вони або замикаються на себе, утворюючи вихрові кільця, або спираються на стінку або на вільну поверхню. В ідеальній рідині за наявності масових сил, які мають однозначний потенціал, інтенсивність вихору не змінюється в часі. З цього випливає, що вихори ідеальної рідини не можуть змінювати свою інтенсивність у просторі та в часі. Вони мають існувати вічно, вони можуть виникати і вироджуватися. Насправді, в реальній рідині через наявність в'язкості вихори зароджуються, а потім дифундують, тобто вироджуються.

Максимальний рівень сталі в проміжному ківші, при якому відбувається прорив повітряного вихору у порожнину стакан-дозатора, можна приблизно визначити за формулою Р. Перельмана:

$$N_{кр} = 0,5D (v/(gD))^{0.5} 0.55 \quad (3.2),$$

де D – діаметр отвору, мм;

v - швидкість рідини в стислому перерізі мм, тобто на відстані приблизно рівній $0,5 D$ нижче за площину самого отвору, м/с.

Розмір v визначається експериментально, чи за номограмою. Зважаючи на вищевикладене, стосовно процесу безперервного лиття сортової заготовки викликає інтерес дослідження впливу процесів вікнино-утворення на затягування неметалевих включень в низхідний потік. На рисунку 3.14 наведено дослідження утворення вікнино-подібних явищ на прозорій моделі проміжного ківша, та сталерозливного вузла проміжного ківша при імітації розливу через нижній (змінний) стакана-дозатор з діаметром «калібрувальної» вставки 17 мм.

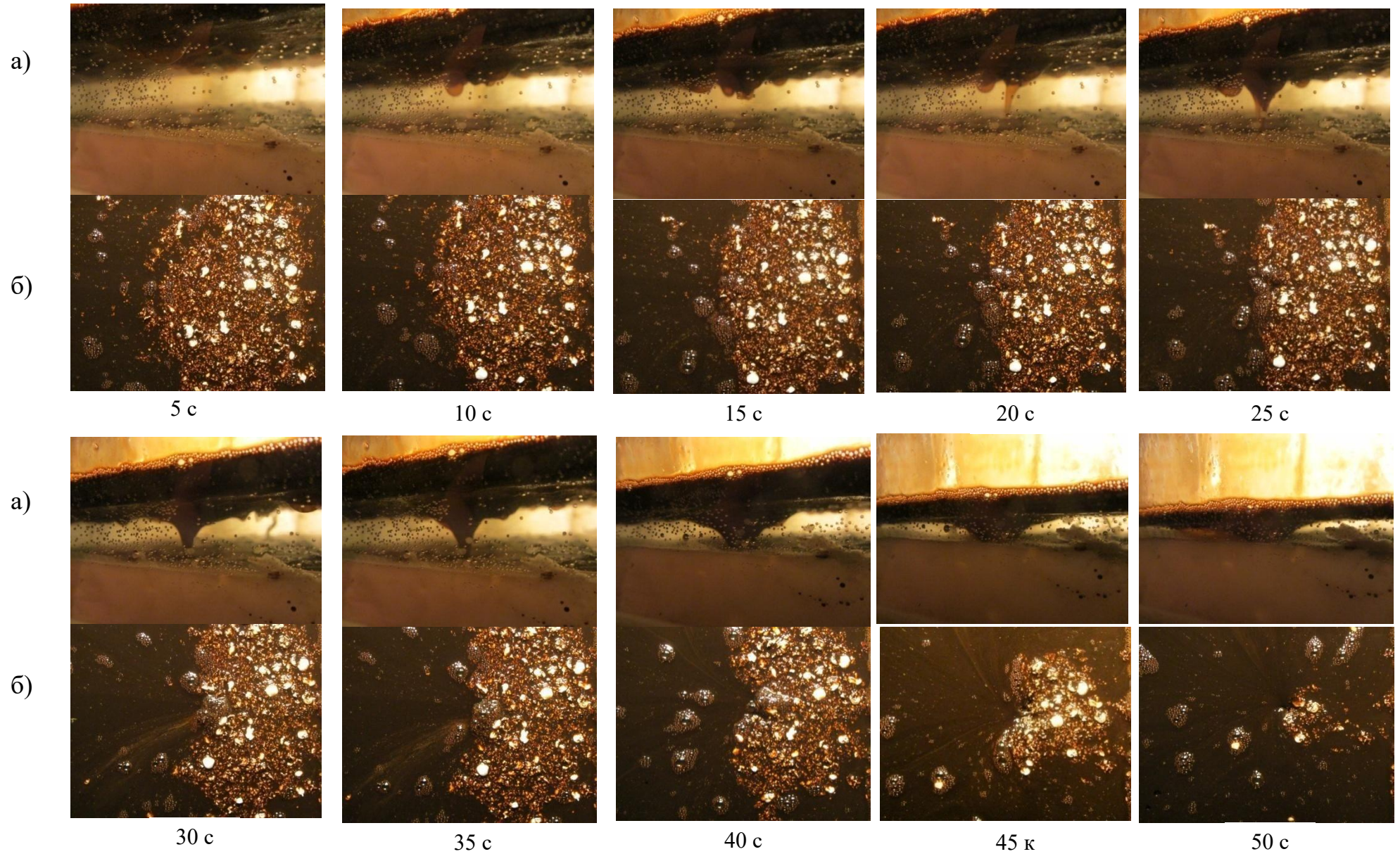


Рисунок 3.14– ПРОЦЕС ЗАТЯГУВАННЯ ІМІТАТОРА ПОКРИВНОГО ШЛАКУ У ПОРОЖНИНІ СТАКАН-ДОЗАТОРА:

А) ВИД ЗБОКУ Б) ВИД ЗВЕРХУ

У ході досліджень процесу поведінки імітаторів шлакових частинок у рідкій ванні моделі проміжного ківша та сталерозливного вузла, було відзначено наступний факт.

Поряд із стійким зтягуванням імітаторів шлакових частинок спостерігалися випадки, коли моделююча рідина, що обертається, відривала частинку покривного шлаку і зтягувала її в порожнину стакан-дозатора (рисунок 3.15), після чого відновлювався процес розливання без залучення частинок. Максимальний рівень наливу в моделі проміжного ківша, при якому зафіксовані подібні випадки, становив 330 мм для використання пінопласту, 180 мм при дослідженні поведінки масла. Відмінності в результатах, отриманих з використанням олії та пінопласту, пояснюються значеннями щільності, в'язкості та дисперсності даних моделюючих речовин.

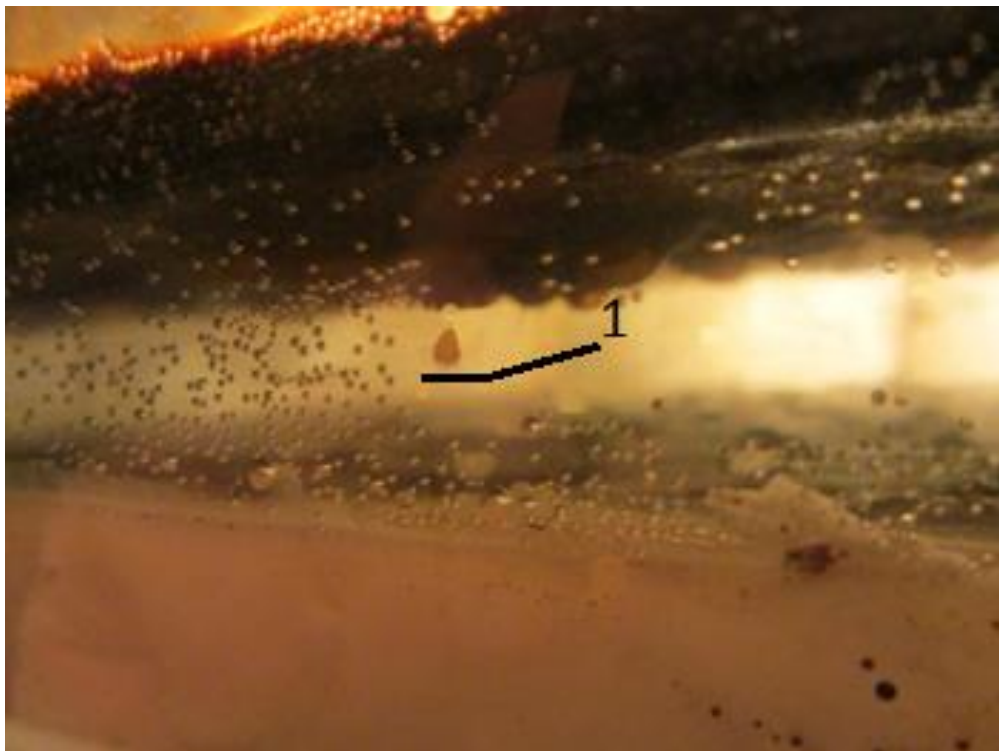


Рисунок 3.15 - Відрив частки від покривного шлаку позиція 1 та захоплення її до утвореної вікнини

Слід зазначити, що процес утворення вікнини вивчалось як незворотний, тобто до повного витікання рідини з моделі проміжного ківша . Однак у процесі зміни сталерозливного ківша рівень металу в проміжному ківші спочатку падає до певного рівня, а потім, після відкриття шибєрного затвора, піднімається.

З цієї точки зору становлять інтерес процеси, які набувають розвитку при зниженні рівня рідини в проміжному ківші до утворення вікнини, та подальшому збільшенні цього показника. Цей процес вивчався на моделі проміжного ківша багаторівчачої МБЛЗ. Рівень моделюючої рідини знижували до моменту утворення стійкої вихрової вікнини а потім поступово підвищували до робочого. При цьому підвищення рівня виробляли з різними швидкостями.

В результаті встановлено, що обертання рідини в моделі проміжного ківша з підвищенням рівня вище $N_{кр}$ не припинялося і тривало деякий час, причому розвинена вікнина періодично практично повністю зникала і знову з'являлася. Профіль вікнини у процесі розвитку цього явища набував чітко витягнутої спіралеподібної форми (рисунок 3.16).



Рисунок 3.16 - Форма вихрової вікнини при підвищенні рівня моделюючої рідини

При цьому вдавалося досягати висоти рівня рідини моделі проміжного ківша рівної 120 - 145 мм, при якій зникала вікнина. Цьому, серед інших чинників, сприяло поступове зменшення площі каналу стакан-дозатора, що моделювали частковим перекриттям випускного отвору.

Результати досліджень поведінки вікнино-подібних явищ дозволяють зробити висновки:

- 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, а також призводить до падіння швидкості розливання. Дані процеси можуть призвести до зниження якості безперервнолитої сортової заготовки внаслідок розвитку вторинного окиснення та затягування шлакових частинок у порожнину кристалізатора;

- 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 стакана-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 при внутрішньому діаметрі стакана-дозатора 17 мм. Закручування рідини навколо осі стакана-дозатора, затягування частинок покривного шлаку і бульбашок повітря струменем рідини має місце при значенні напору рідини в проміжному ківші 600-700мм і існує протягом 7-8 хв. Так як ці значення напору можна порівняти з висотою наливу металу в проміжному ківші ківші при стійкій роботі МБЛЗ, то подібні процеси ймовірно і є причиною попадання частинок покривного шлаку в порожнину стакан-дозатора.

3.4. Дослідження витікання металу на ділянці верхній (постійний)-нижній (змінний) стакан-дозатор, а також розробка та визначення оптимальної конфігурації калібрувальної вставки з метою мінімізації «віялоподібних явищ»

Сучасні тенденції у сфері процесів виробництва та розливання сталі являють собою сукупність інноваційних рішень у галузі підвищення питомої продуктивності агрегатів та поліпшення якості безперервнолитої заготовки.

Слід зазначити, що оптимізація роботи окремих вузлів МБЛЗ має значення. Це пояснюється тим фактом, що при неправильному виборі геометричної форми або неточній установці калібрувального стакана під час розливання сталей, які розкиснені алюмінієм, він має властивість заростати. Заростання калібрувального стакана призводить до порушення турбулентної картини руху потоків у сталепровідному каналі та його достроковій заміні. При цьому в ділянці дзеркала металу в кристалізаторі зростає інтенсивність хвилеутворення (рис. 3.17), що призводить до утворення наплесків і набризків сталі на стінки кристалізатора.

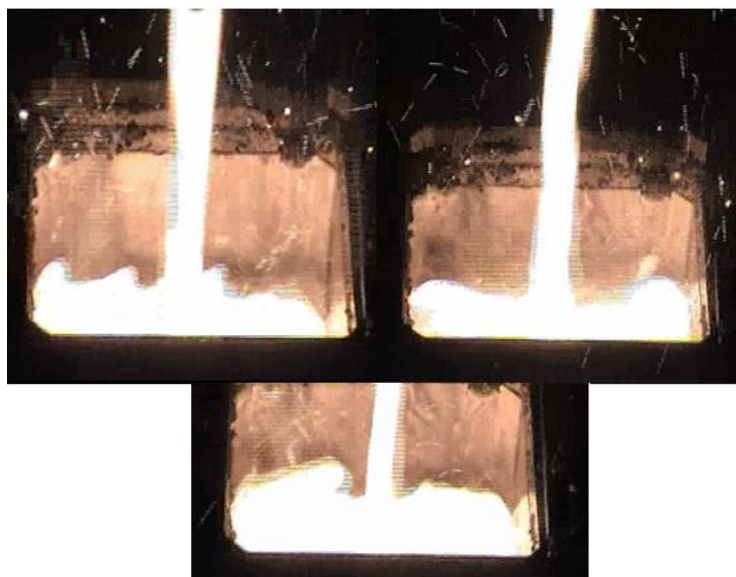


Рисунок 3.17 – Хвилеутворення на дзеркалі металу в кристалізаторі внаслідок віяла металу

Зі зменшенням перерізу заготовки та збільшенням швидкості розливання інтенсивність небажаних процесів на дзеркалі металу в кристалізаторі та обумовлених ними дефектів заготовки зростає.

Зниження техніко-економічної ефективності виробництва сортової МБЛЗ через порушення компактного характеру витікання відкритого струменя з урахуванням особливостей технологічного процесу в загальному випадку обумовлені наступними факторами:

- втратами виробництва МБЛЗ через аварійні прориви металу під кристалізатором або вимушених зупинок рівчаків різної тривалості для їх запобігання;

- додатковими втратами металу у вигляді браку заготовок за «поясами» та короткими (що не відповідають мірній довжині за специфікацією замовника) заготовками, що утворюються через видалення «поясних» ділянок); додаткового головного та хвостового обрізу заготовок; додаткових відходів металу як скрапа в аварійних ємностях;

- додатковою витратою змінних стаканів-дозаторів («глухих», стартових із зменшеним діаметром отвору та робочих) при перезапуску рівчаків МБЛЗ;

- додатковим використанням витратних та вогнетривких матеріалів при перепідготовці рівчака;

- Підвищенням питомих витрат на мідні гільзи кристалізатора, що обумовлено збільшенням швидкості їх зносу і, відповідно, зниженням їх експлуатаційного ресурсу (стійкості) при витягуванні остиглих (після зупинок розливання на рівчаку) заготовок, які часто мають викривлений профіль.

Крім того, як показує промислова практика, після вимушених переривань розливання на рівчаку через «віяла» струменя, в тому числі короткочасних, внаслідок прискореного засмічення форсунок системи вторинного охолодження (ВО) нерідко спостерігається порушення її нормальної роботи. В результаті зростає ймовірність отримання заготовок з підвищеною кривизною і ромбічністю,

що також призводить до зростання швидкості зношування гільз та додаткових втрат металу у вигляді шлюбу заготовок [156].

У цьому аспекті дослідження спрямовані на підвищення стійкості розливного стакану є актуальними і мають важливе практичне значення.

Основною метою даних досліджень є вивчення характерних особливостей розвитку турбулентних потоків та їх можливих траєкторій на ділянці другого технологічного переливу – з проміжного ківша в кристалізатор та вибір оптимальної геометричної форми сталерозливного каналу калібрувальної вставки стакан-дозатора.

У процесі аналізу промислових зразків 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 (закруглення в місці зіткнення стаканів-дозаторів) цирконієвої вставки змінної (нижньої) стакан-дозатора (рисунок 3.18).

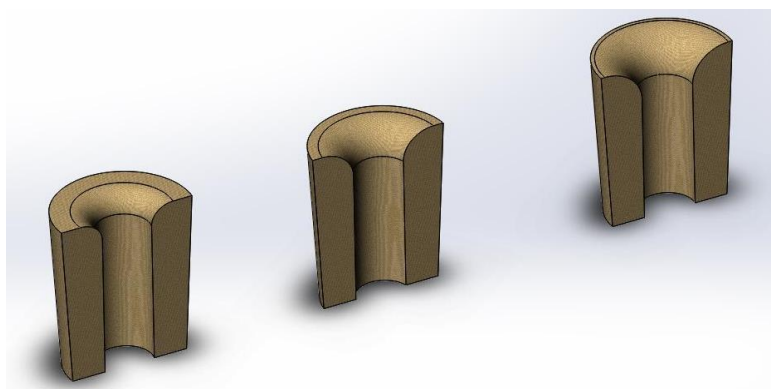


Рисунок 3.18 – Зовнішній вигляд «калібрувальних» вставок з різними конфігураціями заокруглення лійки нижнього стакан-дозатора (зліва на право – заокруглення 1 мм (без заокруглення), заокруглення 6 мм, заокруглення 10 мм)

Вибір конфігурації внутрішньої порожнини «калібрування» вставки може розглядатися як ключовий інструментарій для організації щільного струменя металу при його витіканні на ділянці стакан-дозатор - кристалізатор.

На першому етапі даних досліджень була вивчена динаміка витікання сталі з нижнього стакан-дозатора діаметром 18 мм та верхнього стакан-дозатора діаметром 19 мм. Результати математичного розрахунку представлені на рисунках 3.19, 3.20.

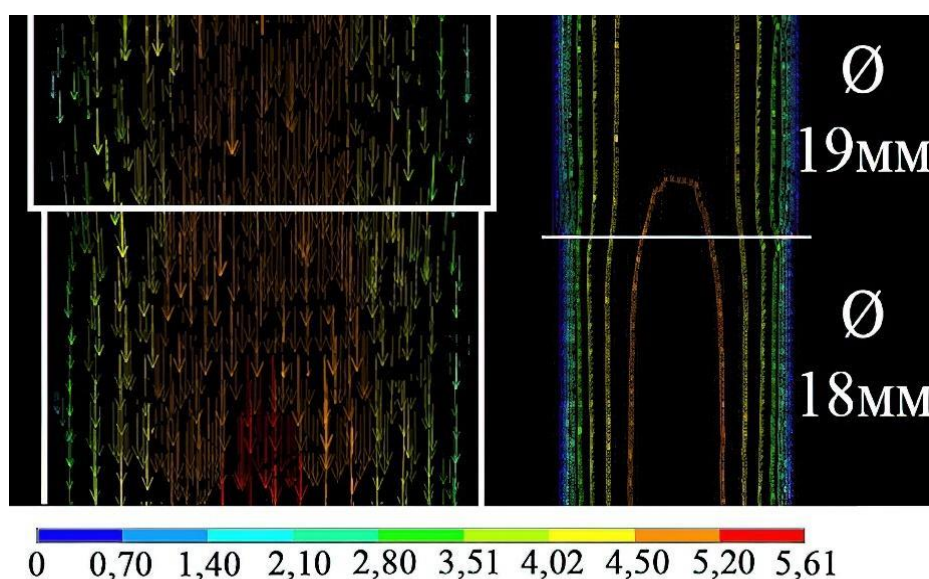


Рисунок 3.19 – Векторні діаграми швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 19 мм (постійного) та 18 мм (змінного)

Детально розглянувши характер витікання для стакан-дозатора без заокруглення (рис. 3.20), можна відзначити, що рух потоків має стабільний збалансований характер. При цьому, стабільність процесу розливання забезпечується за рахунок малої різниці в діаметрах верхнього та нижнього калібрувальних стаканів. При використанні такої конфігурації внутрішнього контуру знижується ймовірність заростання сталерозливного каналу, так як площину, утворений різницею в діаметрах, має невелику площу, а

високошвидкісні потоки рівномірно розподіляються по перерізу стакану, перешкоджаючи утворенню застійних зон.

При використанні стакан-дозатора із заокругленням спостерігається зовсім інша картина поведінки турбулентних потоків у порожнинах стаканів-дозаторів, яка обумовлена різницею геометричного рисунка внутрішнього контуру. З використанням калібрувальної вставки даної конфігурації, течія сталі має нестабільний характер. Це обумовлюється тим, що в області ковзання верхнього та нижнього стаканів-дозаторів утворюється застійна зона, в якій спостерігається течія з низькою швидкістю. Завдяки такому перебігу процесу розливання істотно збільшується ймовірність зародження процесів заростання калібрувального стакан-дозатора неметалевими включеннями і створюються передумови для подальшого розвитку «віялових явищ» на виході з нижнього стакан-дозатора.

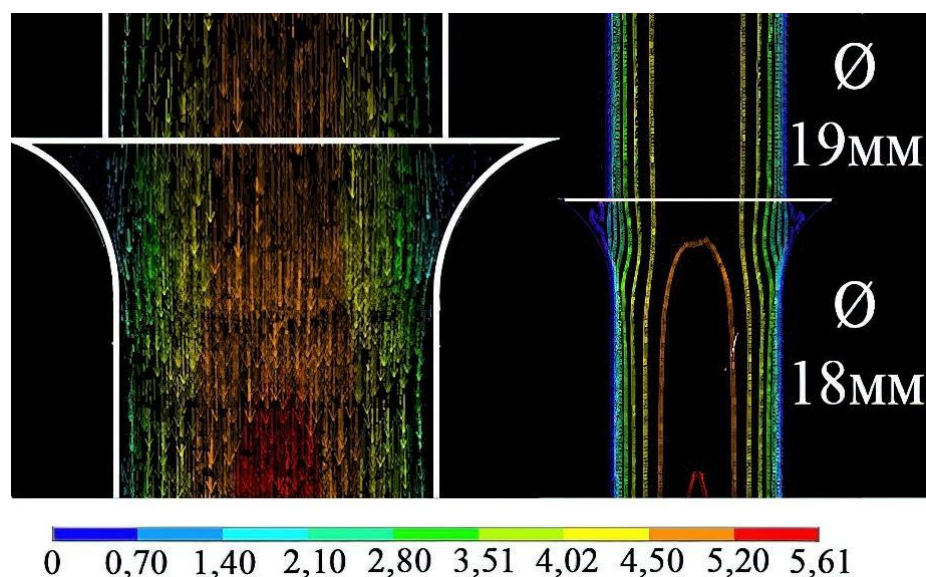


Рисунок 3.20 – Векторні діаграми швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 19 мм (постійного) та 18 мм (змінного за наявності заокруглення).

Виходячи з вищевикладеного, у разі малої відмінності діаметрів верхнього та нижнього стакан-дозатора використання калібрувальних вставок без

заокруглення є найбільш виправданим внаслідок відсутності застійних зон та кращої турбулентної картини по перерізу сталерозливного каналу.

Наступним етапом досліджень стало вивчення особливостей перетікання рідкої сталі з верхньої стакана-дозатора діаметром 20 мм у нижній стакан-дозатор діаметром 18 мм. Векторні діаграми швидкостей представлені на рисунках 3.21, 3.22.

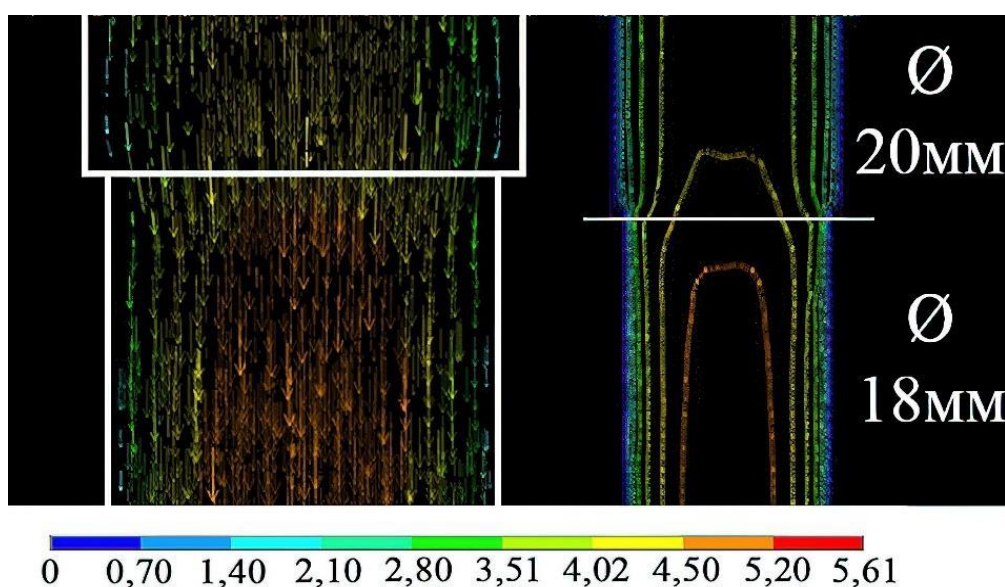


Рисунок 3.21 – Векторні діаграми швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 20 мм (постійного) та 18 мм (змінного)

Динаміка перетікання металу з верхнього стакана-дозатора діаметром 20 мм у стакана діаметром 18 мм подібна до картини, отриманої при витіканні металу з вертикального каналу стакана-дозатора 19 мм у канал діаметром 18 мм. Незважаючи на те, що відмінність у діаметрах верхнього та нижнього стакана-дозатора утворює площину з великою площею, рух потоків також носить стабільний характер. Це можна пояснити тим, що високошвидкісні потоки знаходяться на близькій відстані від стін і активно взаємодіють із площиною. Внаслідок цього застійна зона характеризується невисокою площею, що сприяє стабілізації процесу розливання.

В результаті застосування нижнього стакана-дозатора із заокругленням 10 мм відбувається формування застійної зони, утвореної в місці сполучення калібрувальних вставок верхнього і нижнього стакана-дозатора і заокругленням в якому, як і в першому випадку (рис.3.22), спостерігаються вихрові потоки з низькою швидкістю. При цьому вихрові явища отримують помітно менший розвиток, ніж при перетіканні з верхнього стакана-дозатора з діаметром 19 мм в нижній стакан-дозатор діаметром 18 мм без заокруглення.

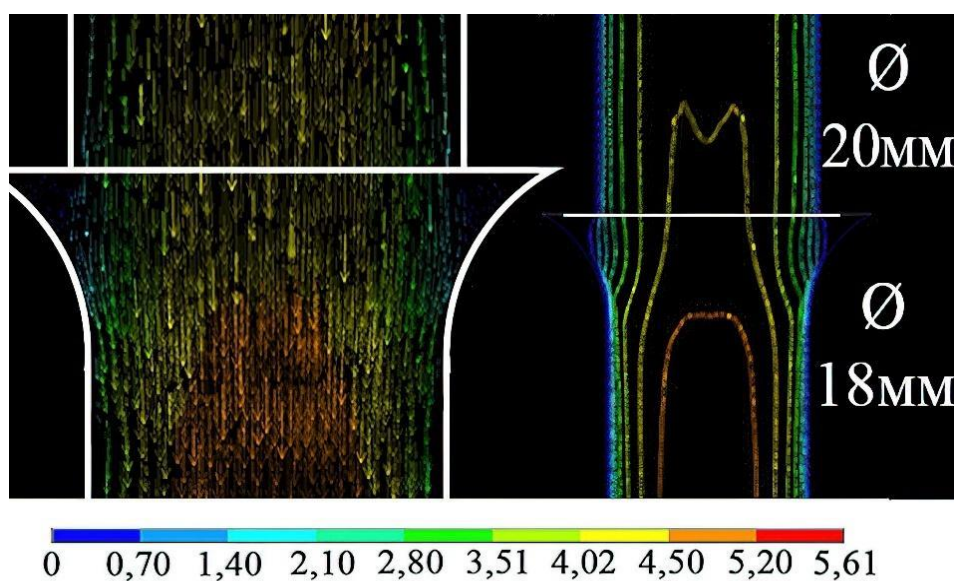


Рисунок 3.22 – Векторні діаграми швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 20 мм (постійного) та 18 мм (змінного за наявності заокруглення)

В результаті моделювання процесу перетікання сталі з верхнього стакана-дозатора діаметром 20 мм в нижній стакан-дозатор діаметром 18 мм можна зробити висновок про те, що більш виправданим є використання розливного стакану без заокруглення. Проте використання заокругленого калібрувального стакану також можливе у разі, якщо дане заокруглення буде менше досліджуваного і складе 4-8 мм. Дане рішення дозволить знизити площу застійної зони та дозволить уникнути площини утвореної різницею в діаметрах каналів.

Третім етапом досліджень стало порівняння векторних картин розподілу потоків при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 21 (верхнього) та 16 мм (нижнього). Результати математичного моделювання руху турбулентних потоків по перерізу каналу розливу представлені на рисунках 3.23,3.24.

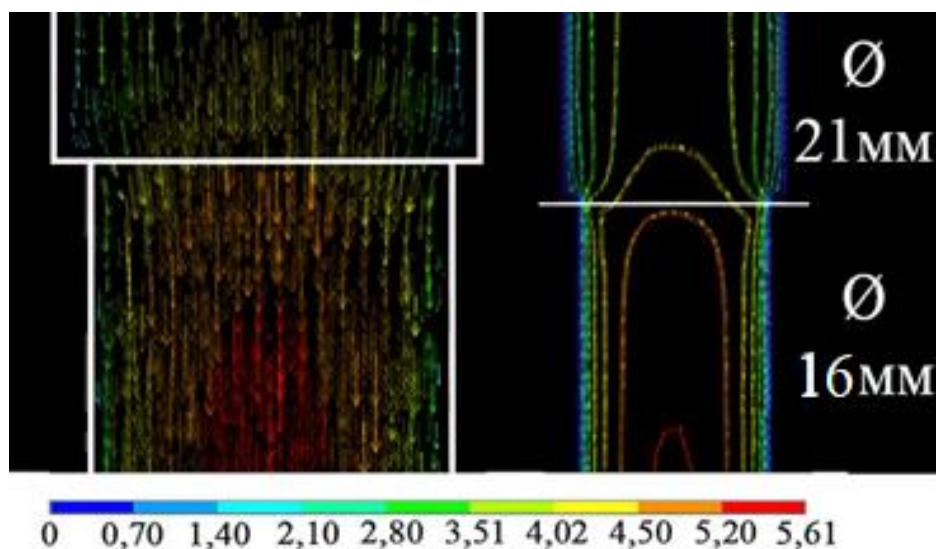


Рисунок 3.23 – Векторні діаграми швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 21 мм (постійного) та 16 мм (змінного).

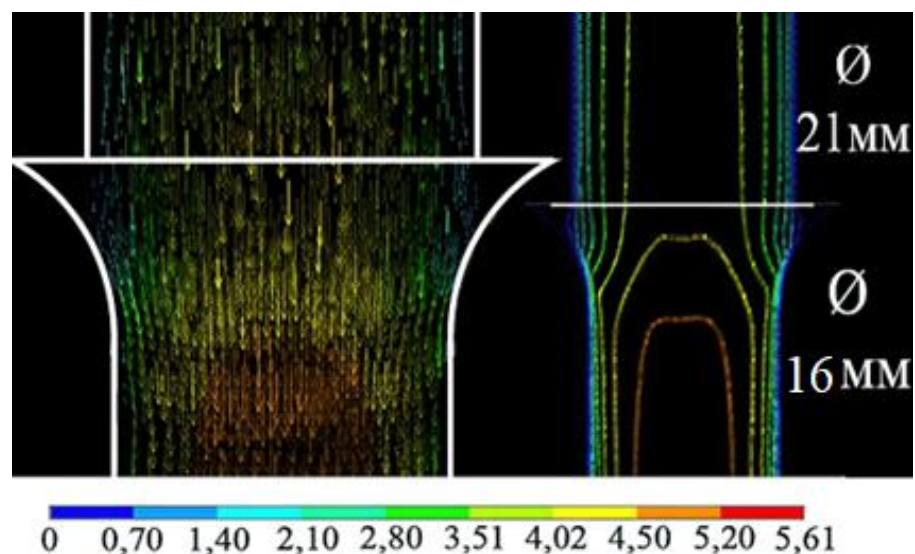


Рисунок 3.24 – Векторні діаграми швидкостей при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 21 мм (постійного) та 16 мм (змінного за наявності заокруглення).

Витік сталі з верхнього стакан-дозатора діаметром 21 мм в нижній стакан-дозатор, що не має заокруглень діаметром 16 мм, носить нестабільний характер (порушення компактності витікання струменя), що підтверджується результатами холодного моделювання на лабораторній установці (рисунок 3.25).



Рисунок 3.25 – Результати моделювання при використанні стаканів-дозаторів з діаметрами 16 мм (без заокруглення (а), та з заокругленням б).

Це пов'язано в першу чергу з великою різницею між площами вертикальних каналів і як наслідок утворення застійної зони в області ковзання. 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, яка утворена стиком верхньої стакан-дозатора і округленням.

Таким чином, така конфігурація внутрішнього контуру призведе до найбільш інтенсивного відкладення продуктів розкислення на його стінках, локального зносу (розмиву) калібрувальної вставки (рисунок 3.26), що призведе до порушення компактності струменя металу.



Рисунок 3.26 – Локальний знос (розмив) калібрувальної вставки нижнього стакан-дозатора внаслідок утворення застійної зони в області ковзання

Утворення «віяла» негайно призведе до заміни дорогого змінного стакан-дозатора на новий, раніше визначеного терміну з метою недопущення аварійних ситуацій та отримання браку готової продукції.

Варіант калібрувальної вставки в нижньому стакані-дозаторі із заокругленням при розливі з верхньою стакан-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 стакан-дозатора. Це видно з малюнка 3.24. 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 стакан-дозатора (Патента №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 металу через стакан-дозатор, що розливається.

«Калібрувальна» вставка, вхідний отвір якої виконано у вигляді конфузора, що переходить в циліндричний канал, який відрізняється тим, що поверхня конфузора вставки верхнього й нижнього стаканів-дозаторів виконана криволінійною, що можна описати радіусом кривизни, обумовленим наступною залежністю:

$$R_{кр} = \frac{D_{к}}{D_{ц.к.}} \cdot K, \quad (3.3),$$

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:

$$K = \frac{H_{к.вс.}}{\pi\sqrt{3}}, \quad (3.4),$$

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

У таблиці 3.11 представлені результати розрахунків оптимального радіусу кривизни лійки калібрувальної вставки для нижніх стаканів-дозаторів з найбільш поширеними внутрішніми діаметрами.

Таблиця 3.11 – Результати розрахунку оптимального радіусу кривизни лійки «калібрувальної» вставки для нижньої стакана-дозатора різного діаметра.

R кр., (Мм) (радіус кривизни конфузора)	Дц.к. (мм) (діаметр циліндричного каналу)	Д до, (Мм) (зовнішній діаметр конфузора)	Н 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

Висновки по третьому розділу

1. При незначній розбіжності діаметрів калібрувальних вставок верхнього та нижнього стакана-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 у сфері її скріплення.

2. При розбіжності діаметрів калібрувальних вставок верхнього та нижнього стакана-дозатора на 1,5-2,0 мм можливе використання нижнього стакану з округленням на 4-7 мм щодо строго вертикального стику калібрувальної вставки (у досліджуваному випадку 10 мм).

3. Розбіжність діаметрів калібрувальних стаканів на більш ніж 2 мм вимагає обов'язкового заокруглення калібрувальної вставки нижнього стакана-дозатора.

4. В умовах сучасного розливання стали відкритим струменем на багаторівчачових МБЛЗ на початку (старті) розливання серії металу, при якій застосовуються верхні стакани-дозатори діаметрами 19,0-21,0 мм та нижні стакан-дозатори «великих» діаметром (18,0-19,5 мм з кроком діаметра калібрувального отвору 0,5 мм) для швидкого набору швидкості розливу, доцільно застосовувати нижні стакан-дозатори з калібрувальними вставками без заокруглення. Це дозволить знизити ймовірність заростання каналу нижнього стакана-дозатора неметалевими включеннями вогнетривкого походження, що утворюються в процесі циркуляції потоків сталі при наповненні проміжного ківша, що дозволить знизити кількість «стартових віял».

5. З метою мінімізації ймовірності осідання на внутрішній порожнині «калібрувальної» вставки нижнього стакана-дозатора продуктів плавки, а також для забезпечення компактності витікання струменя металу через стакан-дозатор, що розливається, була розроблена формула розрахунку оптимального радіусу кривизни лійки «калібрувальної» вставки для нижньої стакана-дозатора які найчастіше використовуються на підприємствах промисловості.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА ЕЛЕМЕНТІВ І СХЕМ ФУТЕРІВКИ ПРОМІЖНОГО КІВША ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ «ВІЯЛА» СТРУМЕНЯ МЕТАЛУ У ХОДІ РОЗЛИВАННЯ

Враховуючи дані про механізм виникнення «віяла» металу при високошвидкісному розливанні сталі відкритим струменем на сортових машинах з використанням систем швидкої зміни стаканів-дозаторів, отриманих у ході проведення фізичного та математичного моделювання, доцільним є розробка та впровадження ряду технологічних заходів, спрямованих на мінімізації прояву дефекту струменя металу у вигляді «віяла» і як наслідок зниження відсортуння безперервнолитої заготовки.

4.1 Загладжування робочого шару футерівки проміжного ківша з метою зменшення виникнення «стартових віял» на початку розливання серії металу на МБЛЗ

З моменту запуску серії розливу металу на МБЛЗ, відкритим струменем (з 1 по 6 плавку), особливо середньовуглецевого сортаменту, характеризується незадовільним розливанням металу внаслідок утворення настилів (заростання) на внутрішній порожнині калібрувальної вставки стакана-дозатора системи «ШЗД», що в свою чергу призводить до наступних негативним наслідків:

- зниження швидкості витікання металу через дозатор, що розливається, через зменшення «калібрувального» діаметра внаслідок його заростання;
- порушення геометрії (компактності) струменя металу (дефект «віяло») через трансформацію калібрувального отвору стакана-дозатора, а також «травмування» внутрішньої порожнини стакана-дозатора внаслідок пропалювання його каналу киснем.

Виконання заміни стакана-дозатора не завжди призводить до стабілізації швидкості розливання при цьому трапляються випадки передчасного закінчення серії через затягування дозаторів.

Виконаний хімічний аналіз відкладень показав, що в них міститься близько 12-15% MgO (методика визначення згідно з ДСТУ 30511.5-97, лабораторні ваги електронні AN-50). 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. При таких концентраціях відновлений магній здатний брати участь у утворенні неметалевих включень типу алюмінатів (MgO-Al₂O₃, FeO-Al₂O₃, CaO-Al₂O₃-MgO), силікатів (2 FeO-SiO₂, 2 MgO-SiO₂) та ін.

Для зниження затягування стакана-дозатора та прояву дефекту розливання «віяла» струменя металу на початку розливу серії на МБЛЗ 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 шиберному затворі сталерозливного ківша (з короткочасним частковим прикриттям шиберного затвора для перевірки його працездатності після наповнення промковшу на $\approx 2/3$ об'єму). Це зумовлено тим, що через комплекс фізичних властивостей MgO (коефіцієнт термічного розширення, теплопровідність, теплоємність, модуль пружності) вогнетривів на основі MgO при охолодженні схильні до термічного розтріскування. При нагріванні перепад температури, що призводить до руйнування, 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 (тоннажем) металу в промковші. При цьому вихід на номінальний рівень металу забезпечувався 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 зниження температури її частини, що не контактує з металом і як слідство її розтріскування.

Будучи тугоплавкими ці продукти при попаданні під струмінь зі сталюквоша можуть бути захоплені потоками і за певних умов зтягнуті в вузли розливу і далі в металопрвідні канали, ставши причиною «віяла». Крім того, в умовах розливання з високою серійністю розтріскування торкрет-покриття через розлив на початку серії на знижених рівнях металу знижує стійкість футерівки оголених від металу ділянок футерівки що погіршує техніко-економічні показники виробництва МБЛЗ. Також для початку серії характерно зменшення отвору стакан-дозатора (зтягування), обумовлене «приробітком» (зносом) високоосновного торкрет-покриття промковша зі зміною хімічного складу поверхневого шару та зниженням рівноважного з ним вмісту кисню в сталі на перших плавках (зазвичай з 1 по 6).

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 з 15.12.2020 р. по 31.01 2021 р. при виконанні футерувальних робіт проводилась спеціальна підготовка проміжного ківша, що полягає в ущільненні та розгладжуванні торкрету шару, після його нанесення (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Вид футерівки проміжного ківша після загладжування шару торкрету в зоні сталі

Результати виконаної роботи наведено у таблицях 4.1 та 4.2.

Таблиця 4.1 – Вплив загладжування робочого шару проміжного ківша на падіння швидкості розливання на 1-6 плавках у серії середньовуглецевого сортаменту

Період	Загальна кількість серій	Серії з падінням швидкості		% серій з падінням швидкості розливання на ПК з футерівким 60x40x60	% серій з падінням швидкості розливання на ПК з футерівким 130x70x70
		Кількість	%		
Листопад 2020р. Без загладжування	26	22	85	85	85
Січень 2021р. з загладжуванням	40	20	50	41	72

Таблиця 4.2 – Вплив загладжування робочого шару проміжного ківша на падіння швидкості розливання на 1-6 плавках у серії низьковуглецевого сортаменту

Період	Загальна кількість серій	Серії з падінням швидкості		% серій з падінням швидкості розливання на ПК з футерівким 60x40x60	% серій з падінням швидкості розливання на ПК з футерівким 130x70x70
		Кількість	%		
Листопад 2020р. Без загладжування	24	15	63	56	83
Січень 2021р. з загладжуванням	38	17	45	45	44

Як видно з таблиці 4.1, 4.2, розгладжування робочого шару футерівки проміжного ківша дало змогу знизити частку серій з падінням швидкості на початку розливання серії як середньовуглецевого, так і низьковуглецевого сортаменту, при цьому ефект, досягнутий під час розливання середньовуглецевого сортаменту, є суттєвішим під час розливання на проміжних ківшах зі схемою футерівки 60x40x60 мм.

У таблиці 4.3 наведена інформація щодо впливу загладжування футерівки робочого шару проміжного ківша на серійність (у статистичний аналіз були включені проміжні ковші, що вийшли з експлуатації по зносу футерівки).

Таблиця 4.3 – Вплив загладжування робочого шару проміжного ківша на серійність залежно від схеми футерівки і сортаменту, що розливається.

Період	ПК 60x40x60 мм		на ПК 130x70x70 мм	
	Середньовуглецевий Сортамент	Низьковуглецевий Сортамент	Середньовуглецевий Сортамент	Низьковуглецевий Сортамент
Листопад 2020р. Без загладжування	13,2	11,2	50,3	33,7
Січень 2021р. З загладжуванням	13,3	12,9	52,0	37,6

З даних таблиці 4.3 виходить, що загладжування робочого шару футерівки проміжного ківша позитивно позначилося і на збільшенні серійності.

Резюмуючи отримані результати в ході впровадження заходу щодо загладжування торктрет шару проміжного ківша можна сказати:

- при загладжуванні робочого шару футерівки проміжного ківша відбувається зниження кількості випадків падінь швидкості розливання на початку серії розливання металу на МБЛЗ середньовуглецевого сортаменту з 85% до 50% та низьковуглецевого з 63% до 45%;

- загладжування робочого шару футерівки проміжного дало змогу досягти збільшення стійкості футерівки проміжного ківша зі схемою футерівки 60x40x60 мм на 0,1 і 0,7 плавок для середньовуглецевого та низьковуглецевого сортаменту

відповідно і 1,7 і 3,9 плавок для середньовуглецевого та низьковуглецевого сортументу відповідно для проміжних ківшів зі схемою футерівки 130x70x70 мм.

4.2 Розробка «стартових» стаканів-дозаторів на основі NBC для старту розливу серії металу на МБЛЗ з метою зниження відсорткування за поясними дефектами заготовки

Основною причиною утворення відсорткування по поясах, зокрема за статтею «віяла струменя», є попадання неметалевих включень (часток вогнетривів) до дозуючого каналу стакана-дозатора і осідання (налипання) їх на стінках ZrO_2 вставці. Динаміку утворення поясних БЛЗ з 2019 року наведено на діаграмі 4.2.

Після впровадження заходу щодо загладжування торкрету шару проміжного ківша, у 2020 р. було досягнуто зниження відсорткування за статтею поясні «віяла» порівняно з результатами 2019 р. (0,043% у 2020 р. порівняно з 0,060% у 2019 р.)

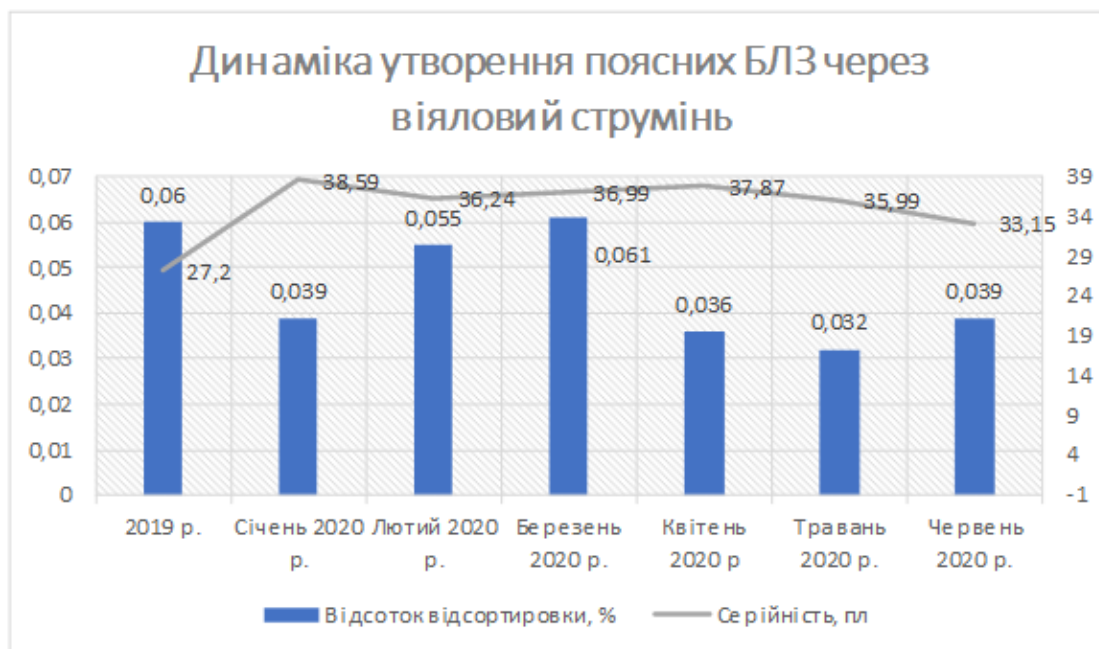


Рисунок 4.2 – Динаміка утворення поясних БЛЗ через віяловий струмінь.

Виходячи з рисунка 4.2 видно, що за період червня (19 днів червня) спостерігається незначне зростання (на 0,007 %) утворення віялового струменя порівняно з попереднім періодом. Для виконання аналізу було взято період із 1

травня по 19 червня. За цей період було проаналізовано 98 серій з використанням різної схеми футерівки проміжних ковшів (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Схеми футерівки робочого шару проміжних ковшів які були проаналізовані в період із 1 травня по 19 червня

Схема футерівки, мм	Кількість серій, шт	Кількість серій, %
50x40x60	3	3,1
60x40x60	31	31,6
90x60x90	1	1
130x80x80	26	26,5
150x90x90	37	37,8

На розлитих серіях, наведених у таблиці 4.4, було зафіксовано відбраковування заготовки за статтею «пояс» через прояви «віяла»: «стартове віяло» 83,46 т (або 57,4% від загальної кількості поясних дефектів), «віяловий» струмінь при перезапуску рівчака – 2,9 т (2%) та «віяловий» струмінь під час розливу серії – 59,03 т (40,6%).

Встановлено, що максимальна кількість випадків порушень компактного характеру витікання струменя металу (рисунок 4.3) посідає початок розливання першої плавки в серії, що зумовлено чинником розвитку так званих «стартових «віял». У ході розливання спостерігається монотонне зниження «віял», що імовірно, обумовлено, зниженням ерозії футерівки промковша в міру збільшення спеченого шару футерівки.



Рисунок 4.3 – Порушення компактності характеру витікання струменя металу («віяла»)

На рисунку 4.4, та 4.5 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).

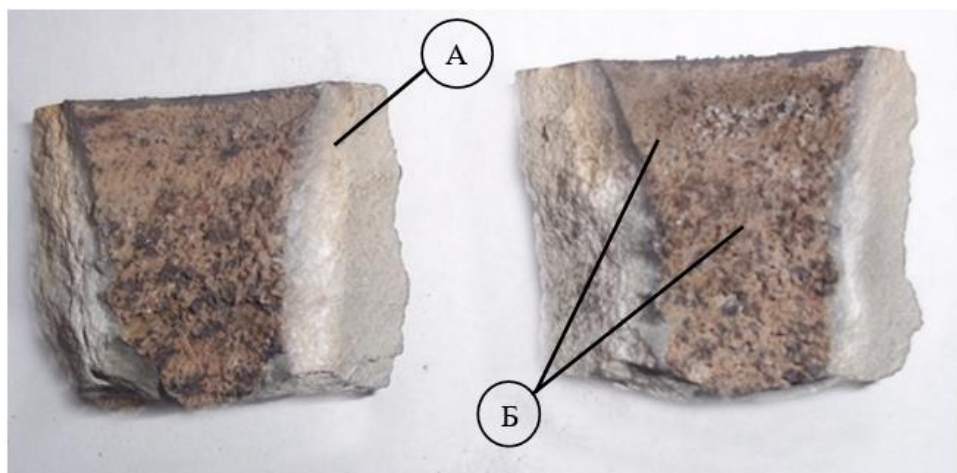


Рисунок 4.4 – Фрагменти калібрувальної цирконієвої вставки стакана-дозатора з відкладеннями неметалевих включень: поз. А – тіло «калібрувальної» вставки; поз. Б - відкладення неметалічних включень

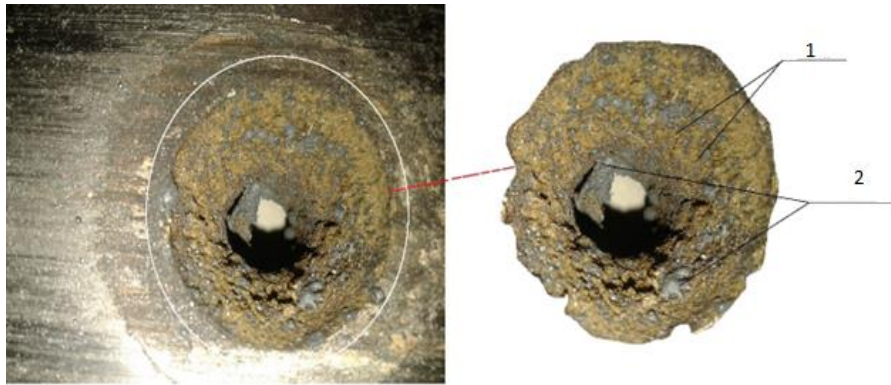


Рисунок 4.5 – Зовнішній вигляд відпрацьованого стакана-дозатора з явно вираженими ознаками заростання сталерозливного каналу «калібрувальної» вставки: позиція 1: відкладення футерівки ПК; 2 позиція: металеві включення

На рисунку 4.6 наведені відібрані зразки відкаденнь, які являють собою механічну суміш неметалевих частинок і крапель (середина фото), що демонструють різну геометричну форму та розміри.

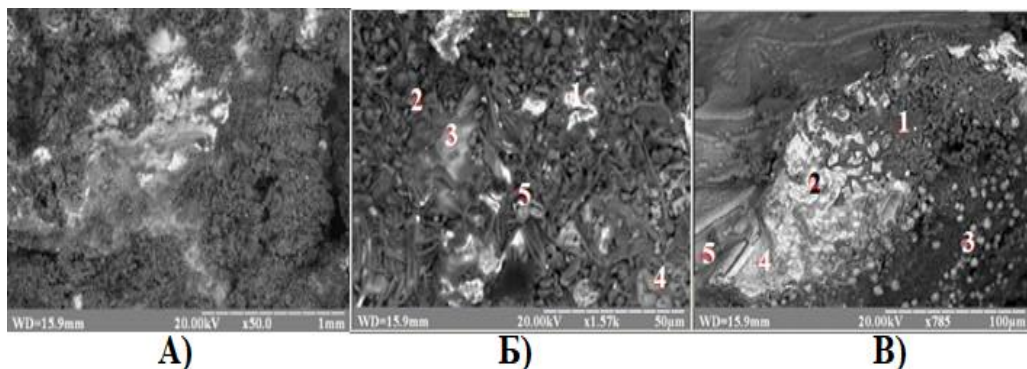


Рисунок 4.6 – Відібрані неметалеві відкладення (а) - збільшення x50; (б) - збільшення x1570; (в) - збільшення x785

Характерною особливістю неметалевої частини відкладень є висока пористість матеріалу, яку слід пояснити механізм 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.

Більше того, збурення поверхневих шарів струменя металу розливного вузла може посилюватися внаслідок підсмоктування атмосферного повітря через

стик між верхнім та нижнім стаканом-дозатором. При цьому від поверхні струменя сталі відриваються краплі, які розбризкуються по внутрішній поверхні «калібровочної» вставки і частково прилипають до неї.

Встановлено, що структура відкладень має досить комірчаста структура (переважно конгломерати частинок магнезиту розміром 1-30 мкм) з вкрапленням металевих частинок, що представлено на рисунку 4.6 б (фотографія неметалічної частини відкладень при великому збільшенні). Зазначені на рисунку 4.6 б точки (фрагменти відкладень) №1-№4 переважно складаються з частинок сталі. Зазначений фрагмент №5 містить MgO – 58,7%; Al₂O₃ - 2,5%; SiO₂ – 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. 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 (≈ 50-60%) і SiO₂ (≈ 20-25%), а також краплі сталі. Це приблизно відповідає співвідношенню цих фаз у торкрет-масах, що використовуються.

У зазначених на рисунку 4.6 точках №2 та №4 ідентифікована сталь, а в точках №3 та №5 – оксид заліза (FeO). Привертає увагу той факт, що частки FeO мають переважно сферичну форму розміром в 5-10 мкм. У точці №1 (між металевим вкрапленням та колонією гілок магнезиту) розташована частка наступного хімічного складу: Al₂O₃ – 15,6%; CaO – 67,5%; Cr₂O₃ – 4,5%; FeO – 12,5%. Мабуть, походження такої частки пов'язане з попаданням у сталь частинок покривного шлаку сталерозливного або проміжного ківша. Наявність у цьому конгломераті оксиду хрому (Cr₂O₃) слід пов'язувати із засипкою, що використовується для відкривання каналу шиберного затвора сталерозливного ківша.

Узагальнюючи виконані металографічні дослідження, можна стверджувати, що у порожнині «калібровочної» вставки стакана-дозавтра відбувається

відкладення Mg-вмістких неметалевих частинок (магнезиту, олівину, тощо), що є продуктами руйнування футерівки проміжного ківша, а також шлакових включень, які потрапляють в метал внаслідок їх захоплення зі сталерозливного і проміжного ківша в процесі розливу. Найбільш ймовірними технологічними ситуаціями, що сприяють захопленню частинок шлаку, є падіння рівня металу в проміжному ковші в процесі заміни порожнього сталерозливного ківша на повний та утворення вікнини.

Виходячи з вищевикладеного 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, а внаслідок чого заростання каналу.

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 ромбоєдричною кристалічною ґратницею, отриманими при азотуванні 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 4.7. Склад виготовлених зразків калібрувальних вставок наведено в таблиці 4.5.

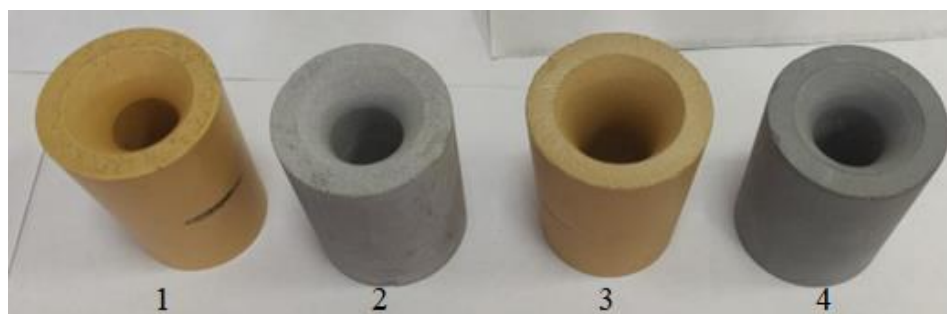


Рисунок 4.7 – Зовнішній вигляд виготовлених зразків калібрувальних вставок для змінних стаканів-дозаторів виготовлених з карбонітриду бору (зразки 2,4) порівняно зі вставками з базового матеріалу ZrO_2 (зразки 1,3)

Таблиця 4.5 - Склад 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» (раніше «ДМК»), який має конвертерне виробництво, у складі якого є установки ковш-піч без вакуумування і 2-ма високопродуктивні 7-ми рівчакowymi сортами МБЛЗ, при розливанні рядового сортаменту, у якості «стартового» змінного стакана-дозатора були встановлені дослідні зразки з калібрувальною вставкою з карбонітриду бору. Загальний вигляд стакана-дозатора зі вставкою з карбонітриду бору наведено на рисунку 4.8.

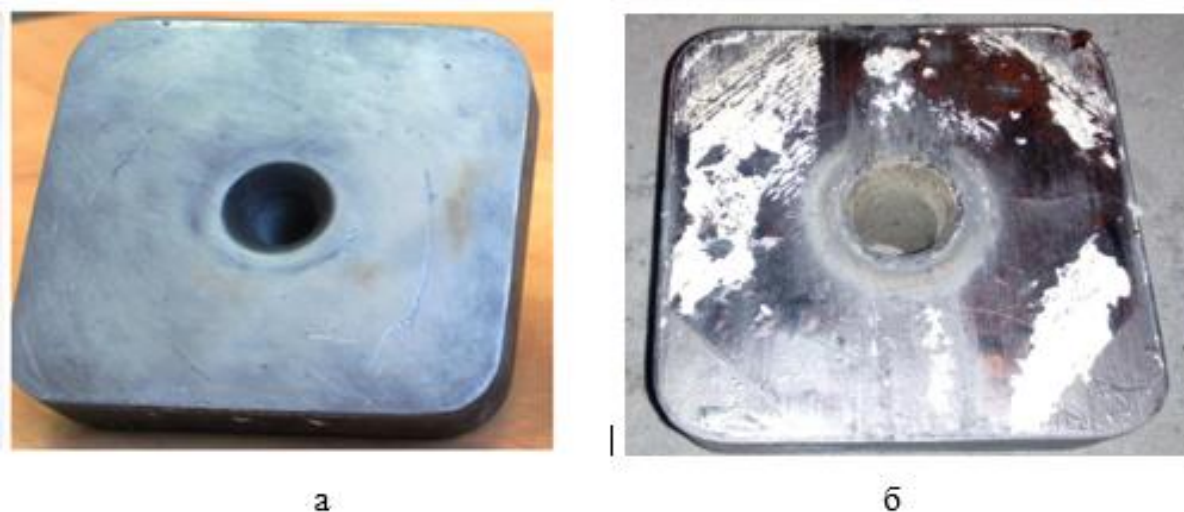


Рисунок 4.8 – Дослідний зразок стакана-дозатора з експериментальною вставкою з карбонітриду бору (робоча поверхня): а – перед розливанням; б – після розливання металу

Дослідні зразки були встановлені як «стартові» стакани-дозатори на двох поспіль серіях розливу металу. На першій серії розливу металу дослідні дозатори були встановлені на рівчаку № 1 (крайньому) та рівчаках № 3, 4 (середніх рівчаках). На другій серії розливання металу дослідні дозатори були встановлені на рівчаку №1 та рівчаках №3, 5.

Тривалість розливання через дослідні стакани-дозатори при розливанні першої серії металу на першому рівчаку склала 21 хвилина, третьому і четвертому рівчаках 24 і 34 хвилини відповідно. Розливання через дослідні стакани-дозатори було перервано шляхом проведення операції заміни на штатні стакани-дозатори з цирконієвою вставкою через збільшення швидкості розливання.

При розливанні першої серії на дослідних рівчаках було відзначено стабільне та компактне витікання струменя металу (рисунок 4.9). При цьому для рівчаків із цирконієвими вставками «віяло» спостерігалось на двох рівчаках (рівчак №2, №5).



Рисунок 4.9 – Розливання металу через дослідний стакан-дозатор зі стабільною геометрією струменя металу, що витікає, з проміжного ківша

Тривалість розливання через дослідні стакани-дозатори при розливанні другої серії металу на першому рівчаку склало 28 хвилин, третьому і п'ятому рівчаку 20 і 29 хвилин відповідно. Розлив через дослідні стакани-дозатори здійснювався стабільно протягом усього періоду проведення експерименту. Наявність «віяла» та порушень геометрії струменя металу 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 із ZrO_2 , мав сильне «віяло» і був зупинений на початку другої плавки. Закінчення розливу через дослідні стакани-дозатори було здійснено за допомогою операції заміни на традиційні стакани-дозатори з цирконієвою вставкою через збільшення швидкості розливання.

У таблиці 4.6 наведено результати виміру геометрії порожнин дослідних стакана-дозаторів. При цьому швидкість зношування калібрувальної вставки стакана-дозатора становило від 0,082 до 0,115 мм/хв.

Таблиця 4.6 - Результати виміру геометрії порожнин дослідних стаканів-дозаторів

№ Зразка	Діаметр порожнини дослідних стаканів-дозаторів перед розливанням, мм	Діаметр порожнини дослідних стаканів-дозатора після розливання, мм	Час розливання через дослідні стакани-дозатори, хв	Знос мм/хв	№ рівчака
1	17,0	19,40	21	0,114	1
2	16,5	18,60	24	0,087	3
3	16,0	18,30	28	0,082	1
4	17,5	19,80	20	0,115	3
5	17,0	19,17	34	0,0638	4
6	16,0	18,34	29	0,0807	5

Причиною припинення розливу через дослідні стакани-дозатори стало помітне збільшення швидкості розливання сталі. Причиною цього стала висока швидкість зношування робочого шару вставки з карбонітрида бору в умовах високошвидкісного безперервного розливання сталі. З метою поліпшення властивостей міцності з карбонітриду бору в його склад можуть вводитися

додаткові добавки ZrO_2 і SiO_2 і тим самим забезпечувати підвищення опір зносу вставок і зростання їх ерозійної стійкості. Також необхідно відзначити і те, що карбонітрид бору можна піддавати 100% рециклінгу, що значно може знизити вартість виготовлення «стартових» стаканів-дозаторів у порівнянні з дорогими виробами зі вставками із ZrO_2 , а також скоротити скупчення радіоактивних ZrO_2 відходів утворених після експлуатації стаканів-дозаторів.

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 (метал, шлак). При цьому більш висока швидкість зносу альтернативних калібрувальних вставок і, отже, більш висока швидкість дозволяє забезпечити стабільний старт процесу лиття та швидко вийти на оптимальні швидкісні показники витікання струменя металу. При цьому розроблені «калібрувальні» стартові вставки мають потенціал у підвищенні стійких показників за рахунок модифікування їх складу ZrO_2 та SiO_2 .

4.3 Дослідження характеру зносу гільзи кристалізатора високошвидкісної сортової МБЛЗ у процесі розливання відкритим струменем

Кількість сталі, що розливається через гільзу кристалізатора в ході кампанії, надає на неї інтенсивний тепловий і механічний вплив. Поступово геометрія її внутрішньої робочої поверхні змінюється, погіршується якість безперервно-ливої заготовки і після певної кількості плавок виводять гільзу з експлуатації. Причини виходу гільзи з ладу можуть бути різними і залежати від ряду факторів: стирання міді, тріщини на робочій поверхні мідних облицювань, викривлення кристалізаторів і випадкові причини, пов'язані з недбалістю в роботі персоналу МБЛЗ.

Так, для кристалізаторів сортових МБЛЗ при розливанні квадратної заготовки зазначено, що в першу чергу зношувалося зносостійке покриття в

кутових областях гільз.

Характер зносу та деформації поверхні в сортових кристалізаторах залежить від конструкції гільзи та умов її охолодження. Промислові випробування гільз («квадрат 120 мм») з одношаровим хромовим та тришаровим покриттями показали, що вдосконаленням технології нанесення покриття, вибором профілю та конусності гільзи можна знизити термічні деформації гільзи в зоні меніска та зменшити стирання покриття.

Підвищення швидкості розливання інтенсифікує тепловий потік та збільшує деформацію профілю гільзи. У цих умовах не тільки прискорюються процеси зносу, але й можуть виявлятися дефекти виготовлення гільзи, нанесення покриття, які не виявляються за низьких швидкостей розливання. Дослідження та узагальнення даних щодо руйнування кристалізаторів в умовах інтенсивної експлуатації дозволить вибрати оптимальні технології їх виготовлення, а також виявити фактори, що впливають на руйнування, що дозволить підвищити продуктивність машин безперервного лиття.

В даному розділі досліджували пошкоджуваність гільз кристалізаторів сортової МБЛЗ при розливанні в промислових умовах заготовок «квадрат 120 мм». Більшість параметрів безперервного лиття (марка сталі, температура розливу, витрата води, що охолоджує, тощо) змінювалися у всіх досліджених плавках незначно. Швидкість розливу для гільз перетином кв.120 мм становила в середньому близько 3,7 м/хв, на окремих плавках сягала 4,5 і більше м/хв.

Було випробувано кілька типів гільз кристалізаторів із різною геометрією робочої порожнини. За формою профілю гільзи розділили на три групи:

1) гільзи з багатоступінчастою параболічною конусністю виробництва фірм «КМЕ» (Німеччина) та «ЕМ» (Італія).

2) гільзи виробництва фірми «Kobelco» (Японія) з удосконаленою параболічною конусністю (тип профілю – «e-mould»), що дозволяє мінімізувати величину газового зазору між безперервно-ливою заготовкою і стінкою мідної гільзи, і шорсткою зовнішньою водоохолоджувальною поверхнею.

Деякі технологічні характеристики досліджуваних гільз наведено у таблиці

4.7. Усі гільзи, вказані в таблиці, мали довжину 1000 мм, при цьому їх ефективна довжина становила 876 мм, базовий радіус МБЛЗ – 9 м. Стійкість досліджених гільз змінювалася у межах наведених в таблиці 4.8.

Таблиця 4.7 - Технологічні показники досліджуваних гільз

Фірма виробник гільзи	Технічні характеристики мідних гільз				
	Матеріал	Конусність	Тип та товщина покриття, мкм	Конусність, (%/м)	
				Рад. гр.	Пар. гр.
«КМЕ», Німеччина	Cu - Ag	параболічна	Cr (120)	0,87	0,88
«ЕМ», Італія	Cu - Ag	4-х конусна	Cr (120)	0,99	1,0
Kobelco, Японія	Cu - Ag	параболічна (e-mould)	Cr (70)	0,89	0,88
Kobelco, Японія	Cu - Ag	параболічна (e-mould)	Ni+P – Co – Cr (70)	0,89	0,88

Таблиця 4.8 - Стійкість вивчених гільз

Фірма - виробник гільз (кількість, шт.)	Стійкість гільз, плавок, середня (мінімум – максимум)
«КМЕ», Німеччина (12)	215 (16 – 351)
«ЕМ», Італія (23)	220 (97 - 460)
«Kobelco», Японія, одношарове покриття (22)	270 (48 – 540)
«Kobelco», Японія, багатошарове покриття (6)	670 (519 – 909)

Зміну геометричних розмірів та короблення стінок гільз кристалізаторів

вивчали за допомогою вимірювальної системи MCS-3000, представленої на рисунку 4.10. Всі гільзи були зняті через появу дефектів, які унеможливають їх подальшу нормальну експлуатацію. Відмінності в конструкції, геометрії гільз, значні відмінності в стійкості дозволили простежити динаміку їх ушкодження та отримати дані про різні види пошкоджень робочої поверхні.



Рисунок 4.10 – Вимірювальна система MCS – 3000 виробництва фірми CONCAST

Система складається з ноутбука 1, вимірювальної головки 2, колони 3, рукоятки 4, контрольного калібру 5, кабелю 6. Геометричні розміри гільзи кристалізатора визначаються за допомогою датчиків, що самопозиціонуються, закріплених у вимірювальній головці, сигнали від яких надходять в ноутбук, потім трансформуються в читаний для комп'ютера вигляд, і виводяться на монітор у вигляді графіка або таблиці, що відображають стан профілю мідної гільзи. Розміри заміряються поблизу кутів і, одночасно, на центральних лініях гільзи по радіальним і паралельним граням.

Найменшу стійкість показали гільзи, ушкодження яких пов'язані з помилками у роботі персоналу, обслуговуючого МБЛЗ. Очевидно, що такі дефекти можуть виникати будь-якому місці гільзи і не залежати від конструкції і

фірми-виробника.

Наприклад, заведення затравки без захисного ковпака оператором МБЛЗ призвело до значної (понад 0,5 мм) деформації профілю гільзи виробництва «КМЕ» по радіальних гранях на рівні 850 мм від верхнього торця гільзи (рисунок 4.11) та гільза була виведена з експлуатації після 16 плавок.

Зменшення геометричних розмірів гільзи понад 0,1 мм з рівня від 850 мм до 1000 мм від верхнього торця гільзи – дефект «утяжка» (рисунок 4.12), який виходить через підтискання гільзи нижньою кришкою кристалізатора з ущільненням при великій конусності гільзи на цій ділянці або при жорсткій її фіксації в обічайці гвинтами, що центрують (рисунок 4.13). Ці дефекти фіксуються лише при контролі профілю вимірювальною системою та практично не видно при візуальному огляді. Гільза виробництва «ЕМ» була виведена з експлуатації з таким дефектом після 7 плавок як така, що втратила геометричний профіль

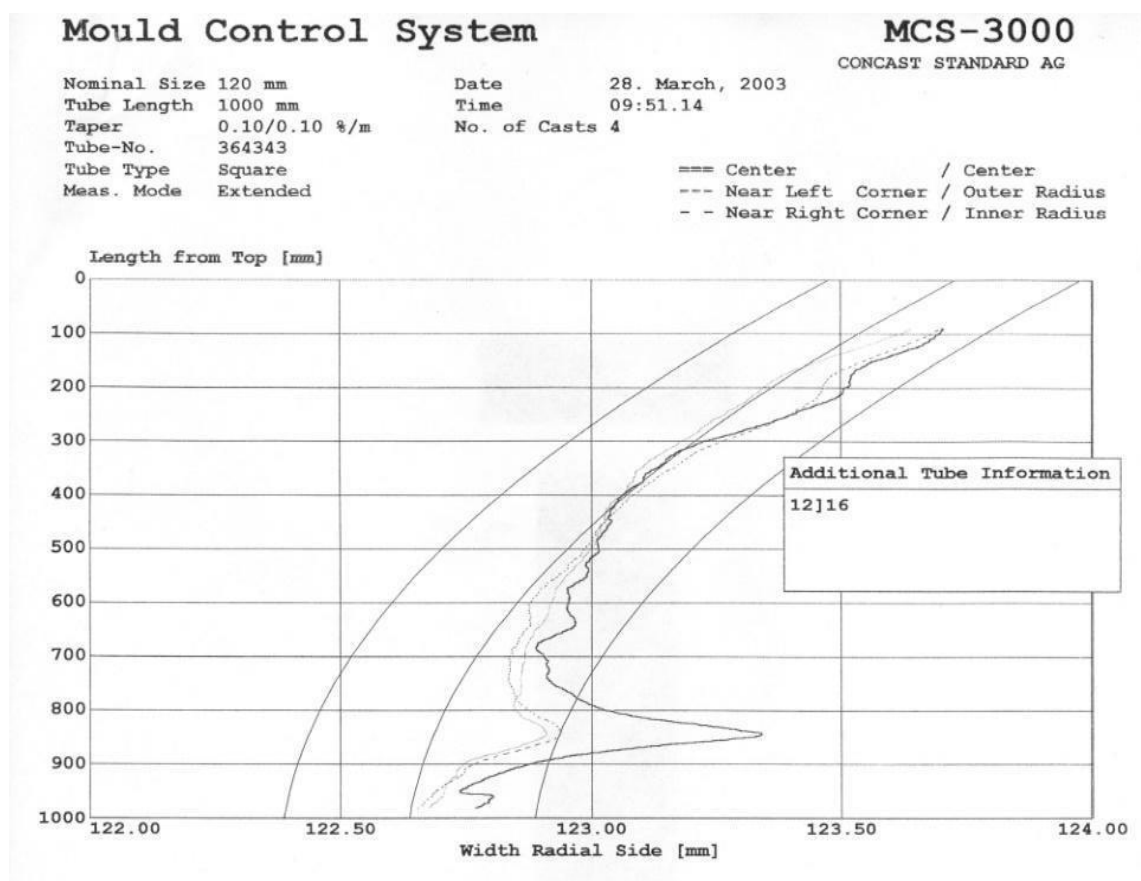


Рисунок 4.11 – Заведення затравки без захисного ковпака оператором МБЛЗ

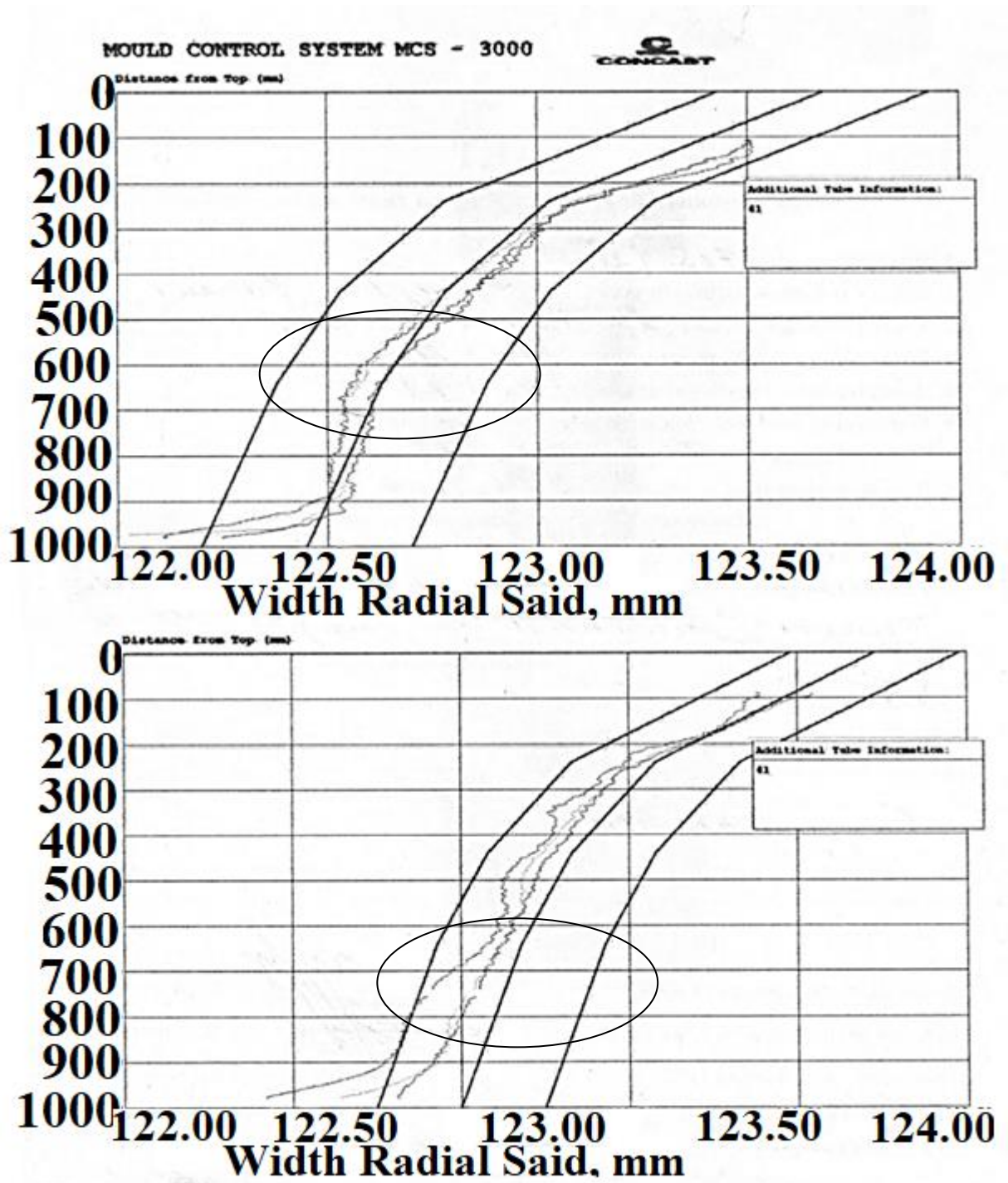


Рисунок 4.12 – Утяжка гільзи в нижній частині по радіальних та паралельних гранях



Малюнок 4.13– Гільза в обічайці (1 – мідна гільза, 2 – обічайка з нержавіючої сталі, 3 – гвинти, що центрують, для фіксації гільзи)

У гільзах, які показали більш високу стійкість, починають виявлятися дефекти покриття. У цьому випадку пошкодження розвивається в зоні дещо нижче від меніска, температура нагрівання якої і, відповідно, температурні напруги та деформації максимальні.

На рисунку 4.14 показано внутрішню робочу поверхню гільзи виробництва «КМЕ» після 123 плавки. Видно, що хромове покриття світле, без видимих слідів окислення, але у районі максимального термічного навантаження виявляється ряд дефектів.

Зношування в кутах ще практично відсутнє, але в покритті з'являються відносно короткі ділянки зношування нерівномірної ширини, що виникають в кутах гільзи приблизно на 5-7 см нижче лінії меніска (поз.1). Можна відзначити несиметричність появи цих ділянок щодо граней гільзи, що вірогідно відбувається в наслідок коливання металу на поверхні кристалізатору, яке має свій розвиток під час «віяла» струменя металу .

Приблизно на рівні меніска і трохи нижче за нього сформувався ряд коротких тріщин у покритті. Видно дві системи таких тріщин: у першій (поз. 2) тріщини йдуть утворює стінки гільзи, у другій (поз. 3) – по довжині гільзи. Ці

тріщини відрізняються характером розвитку, але ймовірною причиною їхньої появи можна вважати термічні деформації стінки, величина яких різна в поздовжньому та поперечному напрямках.



Рисунок 4.15 – Руйнування хромового покриття гільзи

На поверхні покриття виникають досить протяжні (діаметром близько 50 – 60 мм) ділянки руйнування покриття (поз. 4) та смуги краплеподібних раковин (довжиною від 5 до 10 мм, глибиною від 1 до 2 мм), витягнуті по ходу руху БЛЗ. У цих зонах покриття поступово стоншується ділянками. Межі ділянок, згладжені і на далеких стадіях руйнування, більшість покриття оголюється до мідної основи, але в окремих місцях ще зберігаються фрагменти хромового покриття. З урахуванням поступового характеру розвитку ці ділянки можна трактувати як зони ерозійної руйнації (рисунок 4.15).

Металографічні дослідження показали, що однією з причин виникнення руйнування покриття, є недостатня міцність зчеплення хромового покриття з мідною основою. Велика та нерівномірна товщина покриття провокує утворення значних напруг, і порушення контакту на межі розділу мідь-хром, що у свою чергу, викликає нерівномірність тепловідведення та перегрів із розчиненням та випаром покриття. Наприклад, у гільзах «КМЕ», де виникали ділянки ерозійного руйнування, товщина покриття змінювалася від 150 до 200 мкм (1,8 – 2,5 % від

товщини мідної стінки гільзи). Ці дефекти не виявлялися в гільзах виробництва Kobelco (Японія) з товщиною покриття менше 100 мкм.



Рисунок 4.15 – Руйнування покриття на ділянках ерозії

З ділянками ерозійної руйнації пов'язані глибокі ризики, які, як видно з рисунка 4.15, проходять глибоко через покриття та основний матеріал гільзи. Вони виникали в районі підведення струменя та поширювалися вниз по ходу руху заготовки. Можлива причина їх появи – краплі сталі, що застигли, на поверхні заготовки, які надають абразивну дію на поверхню кристалізатора. Інтенсивне утворення застиглих крапель також відбувається в наслідок коливань на поверхні металу в кристалізаторі за рахунок віяла металу при витіканні із стакана-дозатора. При низькій міцності зчеплення покриття та міді абразивні частинки прорізають покриття, викликаючи в ньому відколки, а при виході на міцне покриття частка відвалюється або стирається і риска швидко зникає. Якщо така частка відразу потрапляє на якісне покриття, при її русі створюються послідовні зони розтягування - стиснення, але крихкого руйнування покриття не відбувається.

Ці риски помітно відрізняються від відносно неглибоких (від 1 до 2 мм глибиною) і довших раковин і задир, що виникають на робочій поверхні гільзи внаслідок абразивної або ріжучої дії клиноподібними язиками «поясів» безперервно-ливої заготовки, а також збоями в роботі механізму гойдання

кристалізатора . У цьому випадку ризики виникають на більшій відстані від меніска і являють собою систему великої кількості паралельних ліній.

Також з порушеннями технології можна пов'язати появу глибоких раковин з рваними краями, які близькі формою до кола (від 5 до 8 мм глибиною, діаметром від 10 до 15 мм). І в цьому випадку пошкодження гільзи меншою мірою пов'язане з якістю покриття і виготовлення гільзи і вимагає суворішого дотримання технології безперервного лиття.



Рисунок 4.16 – Раковини з рваними краями

Оскільки збільшення швидкості витягування заготовки передбачає зменшення часу перебування заготовки в кристалізаторі, дуже важливим елементом є забезпечення формування твердої оболонки заготовки і необхідної для стабільного процесу лиття. Одним з таких рішень може бути використання для розливання сталі з високими швидкостями гільзи кристалізаторів, які мають високу експлуатаційну стійкість (500-600 плавів і більше) за рахунок параболічного профілю і нанесення на внутрішню поверхню гільзи багатошарового захисного покриття. Характерний профіль внутрішньої порожнини гільзи наведено на рисунку 4.17. У міру збільшення швидкості розливання було відзначено зниження стійкості гільз на 30-50%. Особливо це виявилось зі збільшенням швидкості витягування заготовки до 3,5-3,6 м/хв і більше (квадрат 150x150 мм).

Виконаний аналіз зміни геометричних розмірів твердого каркасу заготовки внаслідок усадки показав, що в конструкційному плані робоча поверхня гільзи кристалізатора фірми Shinko Metal Products, Co має більшу (ніж усадка) конусність у верхній її частині. Це дозволяє забезпечити щільне притискання твердої оболонки до внутрішньої поверхні заготовки та відповідно підтримувати інтенсивне відведення тепла. Для цієї ділянки збільшення швидкості витягування заготовки не перешкоджає відводу тепла, а щільне прилягання поверхні оболонки до поверхні кристалізатора здійснюється на більш довгій ділянці. Нижче цієї ділянки закон зміни конусності на поверхні гільзи кристалізатора приблизно близький до закону зміни геометричних розмірів заготовки, викликаних усадкою металу.

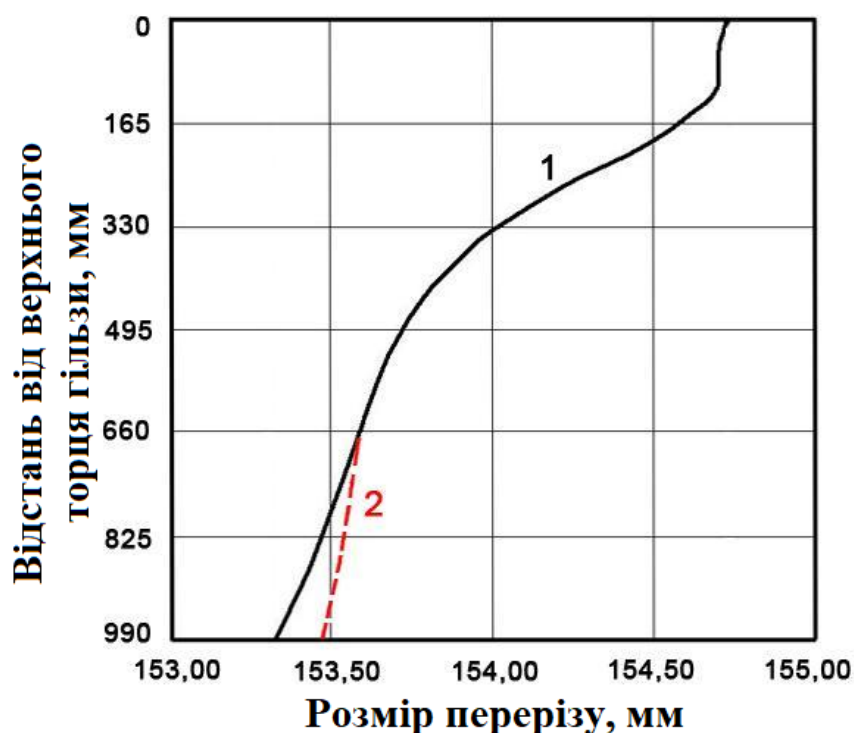


Рисунок 4.17 – Характерний профіль гільзи кристалізатора фірми Shinko Metal Products, Co: 1 – до експлуатації; 2 – зона зношування в нижній частині гільзи

При цьому збільшення швидкості витягування заготовки забезпечує щільне притискання твердої скоринки до внутрішньої поверхні гільзи на довшій ділянці,

що забезпечує більш інтенсивне відведення тепла безпосередньо в нижній частині гільзи. Тим часом слід мати на увазі, що при збільшенні швидкості витяжки заготовки може відбуватися більш нерівномірне затвердіння твердої скоринки.

Так, на рисунку 4.18 а наведено приклад стану внутрішньої поверхні твердої оболонки, яка вийшла внаслідок обриву заготовки. У ході дослідження таких оболонок відзначено хвилеподібність, що становить приблизно 1,2-1,8 мм.



Рисунок 4.18 – Хвилястість на внутрішній поверхні твердої оболонки заготовки (а) та деформація заготовки у поперечному перерізі (б) при швидкості розливання 3,7 м/хв

Така нерівномірність нарощування твердої корки може впливати на деформацію геометричної форми та конфігурацію поперечного перерізу твердої оболонки (рис. 4.18 б). При цьому можливе підвищення інтенсивності тертя між твердою оболонкою та поверхнею гільзи, що слід розглядати як причину підвищеного зношування робочої поверхні гільзи в нижній її частині.

В умовах ПрАТ "Камет-Сталь" ("ДМК") було досліджено розливання довгої серії металу з використанням параболічних кристалізаторів фірми Kobelco на підвищених швидкостях витягування. Досліджувана серія складалася з 41 плавки з перетином заготовки - 150x150 мм, марка сталі - Ст4сп. Швидкість витягування заготовки по всій серії становила 3,44 м/хв, а маса металу в проміжному ковші

підтримувалася досить стабільно (рисунок 4.19).

При цьому кількість рівчаків, розлитих зі швидкістю витяжки понад 3,6 м/хв, склала 57, з яких 8 рівчаків (за плавками) працювали зі швидкістю витяжки понад 3,7 м/хв. Рекордна швидкість витяжки заготовки по рівчаку становила 3,77 м/хв.

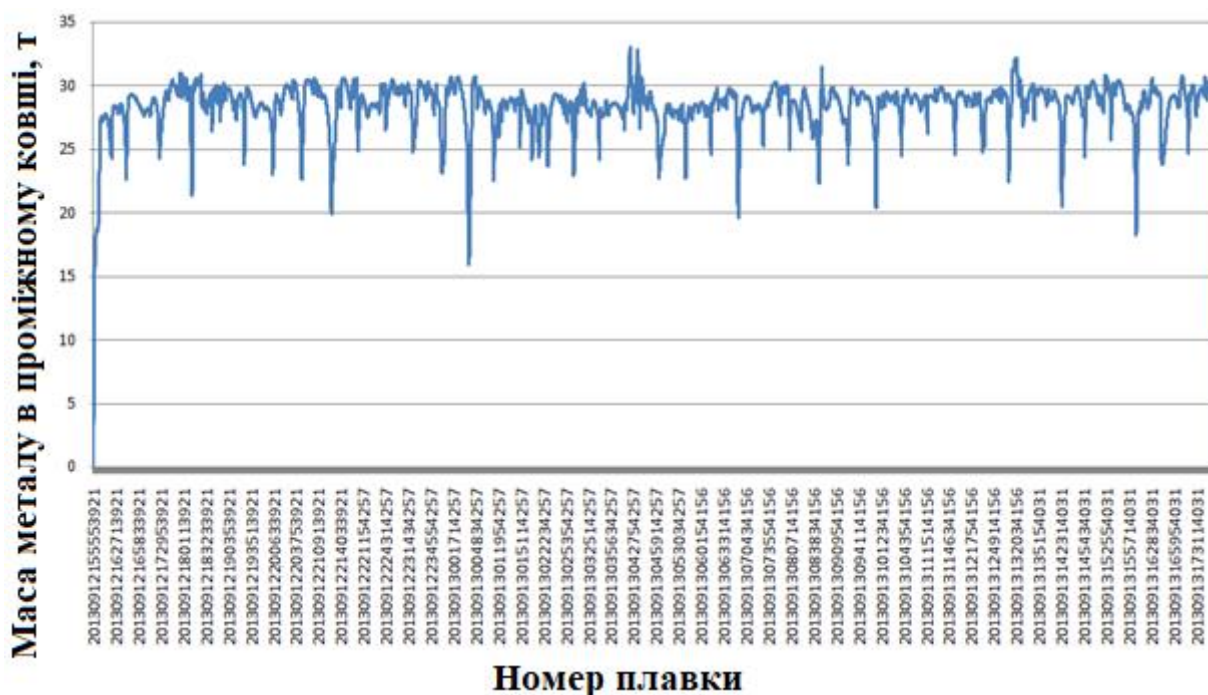


Рисунок 4.19 – Зміна маси металу у проміжному ковші під час розливання серії 12-13 вересня 2019 р.

При дослідженні гільз, що мають параболічну форму з багат шаровою поверхнею виробництва фірми Kobelco, Co, було виявлено їх рівномірне зношення кутових областей в гільзі. Зношення на гранях гільзи не спостерігалось. У районі меніска за великої кількості плавок розвивалася сітка розпаду, спричинена процесами термічної втоми. На момент дослідження цих гільз їхня стійкість склала 780 пл. Ці гільзи експлуатувалися без видимих порушень технологічного процесу безперервного лиття та показали очікувано високу стійкість.

Для забезпечення безперервного розливання наддовгими серіями на підвищених швидкостях доцільно застосування гільз кристалізатора, що мають

параболічну форму внутрішньої порожнини. Така форма враховує динаміку твердіння та ступінь усадки і є найбільш раціональним рішенням як з точки зору досягнення стійких характеристик самої гільзи, так і з точки зору забезпечення високої якості заготівлі, що розливається, а у сукупності зі зменшенням прояви «віял» струменя металу може забезпечити високу стійкість гільз кристалізатора.

4.4 Використання пускових воронок для зниження турбулентних вихрових структур на старті розливання серії металу на МБЛЗ

Для зниження "віял" 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. При цьому вхід в канал від днища промковша розташований на певній відстані. Перевагою таких пускових воронок перед стаціонарними, які встановлюються безпосередньо на верхній стакан-дозатор є те, що для експлуатації нестационарної воронки не потрібно уніфікації «калібрувальної» вставки верхнього стакана-дозатора для щільного та надійного стикування з воронкою, та виключає обов'язкове погодження з постачальником з урахуванням вимог щодо гарантованого монтажу розглянутих вогнетривів у розливному вузлі. Зважаючи на це у виробничому процесі можуть бути застосовані верхні стакани-дозатори різних фірм-постачальників з різними конфігураціями «калібрувальних» вставок і можуть купуватися підприємством без комплексного постачання елементів деталей розливного вузла та виключити необхідність уточнювати з урахуванням фактичних показників розмірних ланцюгів та поверхонь базування.

Також до мінусів стаціонарних воронок можна віднести і те, що при зниженні рівня наливу металу в проміжному ковші до верхнього зрізу стаціонарної воронки, буде призводити до зародження вихрової вікнини

безпосередньо в її порожнині над розливним вузлом з утворенням ниток воронки від верхнього зрізу.

Креслення стаціонарної пускової воронки, що встановлюється безпосередньо на верхній стакан-дозатор, відображено на рисунку 4.20.

Верхні торці пускових воронок можуть бути виконані з косими зрізами або можливий варіант виконання воронки з наскрізним отвором у верхній її частині на відстані 45-55 мм від верхнього зрізу воронки. Таке технічне рішення спирається на фундаментальні закономірності теорії механіки рідини та газу та забезпечує «фільтрацію» потоків з об'єму промковшу в металопрвідні канали від переважно велико- та середньомасштабних турбулентних структур. Розміри пускових воронки наведені в таблиці 4.9

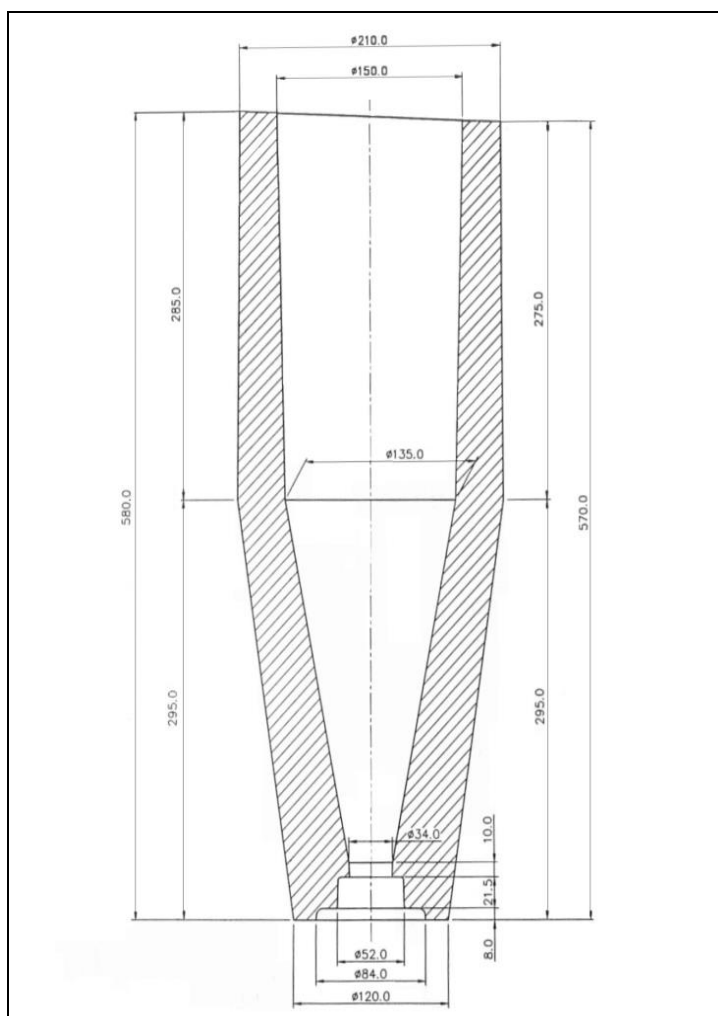


Рисунок 4.20 – креслення стаціонарної пускової воронки, що встановлюється безпосередньо на верхній стакан-дозатор

Таблиця 4.9 - Розміри пускових воронок

Типорозмір	Розмір виробів, мм				
	Загальна висота	Внутрішній діаметр	Зовнішній діаметр	Висота вхідного отвору	Діаметр отвору,
Короткі	280	130	170	210	60
Середні	400	130	170	300	60
Довгі	500	130	170	400	60

Крім того, важливою перевагою схеми футерівки промковша з використанням пускових воронок є авто-відкриття рівчаків без використання стартових засіпок та кисню для пропалювання каналів дозаторів (за винятком резервних рівчаків), що помітно спрощує відповідальну процедуру старту. Старт рівчаків без пропалювання дозаторів киснем знижує ймовірність «віяла» через пошкодження каналу дозатора. Для розосередженого та згрупованого старту рівчаків, воронки мають 3 типорозміри, що відрізняються висотою циліндричної частини. Однакові воронки встановлюються на центральний (P4), середні (P3,5,6) і крайні (P1,7) рівчаки, що забезпечує відповідно їх відкриття по поєднаних групах.

На рисунку 4.21 представлена робоча схема футерівки проміжного ківша ПрАТ "Камет-Сталь" із встановленими пусковими воронками всіх типорозмірів. На рисунку 4.22 наведено проміжний ковш із встановленими пусковими воронками компанії ТОВ «Гір-Інжиніринг».

Можна відзначити, що на ПрАТ "Камет-Сталь" почали застосування пускових воронок виробництва ТОВ «Гір-Інжиніринг» з локалізацією їх виробництва в Україні (раніше подібні матеріали виготовлялися переважно у КНР), що зумовлює невисокі ціни на вироби за високої якості виробів.

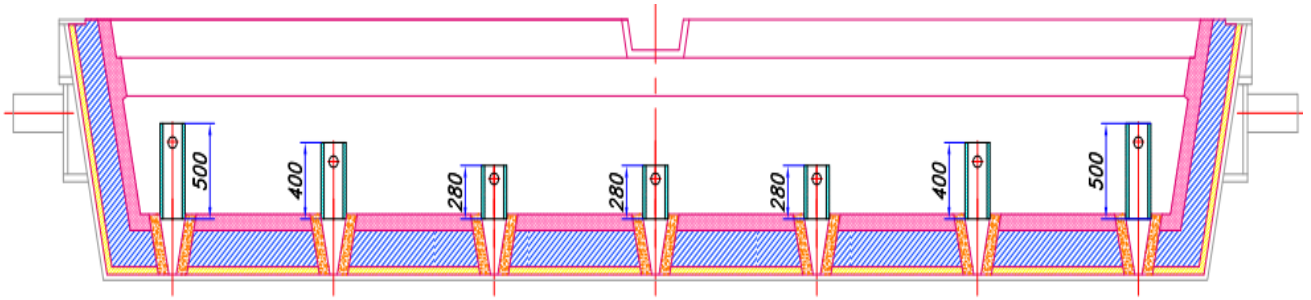


Рисунок 4.21 – схема розташування пускових воронки у проміжному ковші
ПрАТ «Камет-Сталь»



Рисунок 4.22 – Проміжний ківш із встановленими пусковими воронками
компанії ТОВ «Гір-Інжиніринг»

Встановлення пускових воронки у проміжний ківш проводиться за допомогою магнезійного розчину після торкретування проміжного ківша . Подальше футерівки днища проміжного ківша а також його теплова обробка (сушіння, розігрів) здійснюється за діючою технологією в цеху.

Відстань від днища зафутерованого проміжного ківша до верхньої грані пускової воронки складає: по рівчаках P1,7 – 500мм, по рівчаках P2,3,5,6 – 400мм, по рівчаку P4 – 280мм. Цей геометричний параметр визначений з умови послідовного автовідкриття (з взяттям рівчака на жолоб) груп рівчаків P4, P2,3,5,6, та P1,7.

При підготовці проміжного ківша до розливу, засипання стартової суміші по рівчаках не проводилося. Система CNC була у робочій позиції (без відсікаючої плити). У момент заповнення проміжного ківша металом зливні жолоби знаходилися під рівчаками.

Після досягнення рівня металу в проміжному ківші верхнього зрізу пускової воронки, витікання металу з проміжного ківша відбувалося через стакан-дозатор в поворотний жолоб. Різна висота пускових воронок дозволяла починати запуск рівчаків по чергово.

Оціночними параметрами розливу металу за технологією з пусковими воронками було обрано наступні:

- маса металу у проміжному ківші при наповненні металу зі стакан-дозатора залежно від висоти пускової воронки;
- час формування струменя металу над поворотним жолобом за наявності пускової воронки на рівчаку та запуску за існуючою технологією.

Із застосуванням у проміжному ківші пускових воронок було відстежено 4 серії розливання металу.

Початок появи металу над поворотним жолобом на рівчаках №№ 1 та 7 відбувався при наповненні до маси 8-11 т, на рівчаках №№ 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. Формування струменя тривало протягом 30-40 с, поворотний жолоб відводився убік і після цього здійснювався запуск рівчака.

При запуску рівчаків за технологією без застосування пускових воронок, спочатку здійснювалася заміна блоку-заглушки на «калібрувальний» стакан-дозатор з подальшим пропалюванням каналу верхнього (постійного) стакан-дозатора і для більш швидкого формування струменя металу проводилася заміна

нижнього (змінного) стакан-дозатора на новий. Пропалювання верхнього (постійного) стакан-дозатора киснем призводить до його підвищеного зносу або руйнування, а оксиди при пропалюванні, що потрапляють в кристалізатор, можуть спричинити пусковий прорив. Формування струменя через наявне пропалювання відбувалося дещо довше і становила 50 - 60 с.

Виконання точок входу металу в металопрвідні канали віддаленими на деякій відстані над рівнем днища, 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 при наповненні ківша забезпечуючи їх спливання з наступною асиміляцією шлаковим розплавом.

Негативним моментом при використанні пускових воронок з'явилися проблеми перезапуску рівчаків. Внаслідок вихідної залишкової висоти пускової воронки практично протягом усього серії плавок відбувається утворення застійної кількості металу над рівчаком, що призводить до необхідності тривалого відкриття рівчака із застосуванням кисню і можливого розмиву верхнього стакан-дозатора.

З метою виключення негативного моменту, 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.

Фізико-хімічні показники пускових воронок, що руйнуються, наведені в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 - Фізико-хімічні властивості пускових (стартових) воронок марки «GIR-Start» виробництва компанії ТОВ «Гір-Інжиніринг»

Технічні характеристики	Одиниця виміру	Показник
SiO ₂	%	52,0
Al ₂ O ₃	%	47,0
щільність	кг/м ³	292

Запропонована схема футерівки промковша з використанням пускових воронок у розливних вузлах є ефективним технологічним рішенням, спрямованим на гідродинамічну стабілізацію розливу на старті серії та зниження кількості «віял» 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, що утворюються в результаті підготовки проміжного ківша та його транспортування. Запропонована схема забезпечує роздільне за часом (тоннажем і висотою наповнення промковша) автовідкриття груп рівчаків без використання стартових засипок і кисню для пропалювання каналів дозаторів (за винятком резервних рівчаків), що помітно спрощує процедуру старту і знижує залежність стабільності технології від суб'єктивного чинника (кваліфікації персоналу). Старт рівчаків без пропалювання дозаторів киснем знижує також імовірність проривів під час запуску рівчака і розвитку "віял" через порушення геометрії каналів дозаторів. Застосування пускових воронок дозволяє скоротити тривалість формування струменя на 20 секунд і виключити використання перед запуском рівчака плити-заглушки і нижні стакани-дозатори, яка змінюється для стабілізації струменя.

4.5. Розрахунок очікуваного економічного ефекту від зниження «віял» за рахунок впроваджених заходів

Залежно від умов розливання та інтенсивності «віяла» струменя можливі наступні штатні варіанти дій персоналу зі стабілізації розливання.

1. При розливанні на дозаторах з діаметром каналу менше $\text{Ø}18,0\text{мм}$ у разі сильного «віяла» струменя здійснюється взяття рівчака на жолоб з короткочасною (до 1 хв.) зупинкою витягування заготовки та подальшим відновленням подачі металу в кристалізатор після стабілізації струменя та заміни дозатора (без зміни діаметра). Під час розливання на дозаторах $\text{Ø}18\text{ мм}$ і більше взяття рівчака на

жолоб, як правило, не проводять через значне розбризкування струменя і вибризкування металу з жолоба на плиту кристалізатора.

2. Під час розливання на дозаторах діаметром $\text{Ø}18\text{-}19,0$ мм у разі сильного "віяла" струменя і в тому разі, якщо заміна дозатора з короткочасним утриманням рівчака на жолобі за п. 1 не усуває "віяла", "віяловий" струмінь перекривають "глухим" дозатором, витягування заготовки зупиняють, у кристалізатор для можливості наступного перезапуску рівчака встановлюють "розхідник" (затравочне пристосування) для міцного з'єднання заготовок. Перезапуск рівчака за цією схемою проводиться в період часу до 10-15 хв. після зупинки витягування. При повторному запуску рівчака відкривається з використанням проміжного дозатора $\text{Ø}15,0 - 15,5$ мм і кисню. Після виходу на стабільний режим розливання проводиться заміна дозатора $\text{Ø}15,0 - 15,5$ мм на "робочий" $\text{Ø}16,0 - 19,0$ мм, який забезпечує номінальну швидкість розливання.

3. У разі, якщо зупинка витягування за п.2 перевищує 10-15 хв., то проводиться перезапуск рівчака з виводом заготовки та його повною перепідготовкою, що включає заклад та забивання затравки з використанням витратних матеріалів (пластикового ковпака, холодильника, елемента, що заморожує). Зазначене обмеження за часом пов'язане з ризиком виведення з ладу приводу ТПМ при випрямленні заготовки, що сильно остигла. Запуск рівчака при цьому здійснюється аналогічно варіанту п.2 - з використанням проміжного дозатора $\text{Ø}15,0 - 15,5$ мм.

З урахуванням поданих варіантів дій розглянемо додаткові витрати та втрати при відновленні розливання після «віяла» струменя, які призводять до подорожчання безперервнолитих заготовок. Загалом додаткові витрати та втрати при «віялах» з урахуванням особливостей технологічного процесу БРС зумовлені такими факторами:

- втратами виробництва МБЛЗ через вимушені зупинки рівчаків для стабілізації струменя, у т.ч. короткочасних (до 1 хв.), без перепідготовки рівчака (при зупинці витягування до 10-15 хв) та з повною перепідготовкою рівчака (при зупинці витягування понад 10-15 хв.);

- додатковою витратою змінних дозаторів системи ШЗД («глухих», проміжних Ø15,0 – 15,5 мм та з номінальним робочим діаметром Ø16,0-19 мм) при перезапуску рівчаків;

- додатковим використанням витратних матеріалів при перезапуску рівчаків без виведення заготовки з рівчака;

- додатковим використанням витратних матеріалів (пластиковий ковпак, холодильник, елемент, що заморожує) при перепідготовці рівчака з виведенням заготовки та заведенням затравки;

- підвищенням питомих витрат (грн/т) на мідні гільзи кристалізатора, зумовлених зниженням їхньої стійкості внаслідок термічних деформацій профілю заготовки внаслідок зупинок витягування для стабілізації «віялового струменя». В результаті витягування остиглих заготовок, що мають нерідко спотворений геометричний профіль, збільшується швидкість зносу гільз, в т.ч. через утворення на поверхні гільз подряпин та задирів;

- додатковими втратами металу у вигляді брака заготовок за «поясами» та «коротких» (через видалення «поясних» ділянок), додаткового головного та хвостового обрізу заготовок, а також додаткових відходів у вигляді скрапу аварійних ємностей при взятті «віялових» струменів на жолоб.

При впровадженні розроблених заходів, включаючи запропоновану схему футерівки (загладжування торкрету шару футерівки проміжного ківша), додаткові витрати і втрати, зумовлені «віялами», знижуються.

У таблиці 4.11, 4.12 представлені вихідні дані для розрахунку економічного ефекту, взяті зі звітів по роботі МБЛЗ у 2021 р., статистики щодо «віяла» за 2021р. та поточних цінових показників.

Таблиця 4.11- вихідні дані для розрахунку економічного ефекту, взяті зі звітів по роботі МБЛЗ у 2020 р., статистики щодо «віяла» за 2021р. та поточних цінових показників

Показник		Позначення	Розмірність	Значення
Обсяг виробництва МБЛЗ-1,3 у 2021р.		ОВΣ	т/рік	3 737 317
Кількість серій		К	шт.	336
Середня серійність безстопорного розливання		С	пл. у серії	46,14
Середня кількість рівчаків у роботі		N _{ср}	шт.	6,70
Середня маса плавки по придатному		M _{пл}	т	234,55
Середня тривалість розливання плавки		T _{пл}	хв.	63,1
Умовно постійні витрати по сталеплавильному переділу		V _{уп}	грн/т	н.д.
Питомі витрати на гільзи*1		ПВ _г	грн/т	5,88
Ціна дозаторів *2	- «глухого»	Ц _{гл.доз} Ц _{р.доз} Ц _{ст.доз}	Usd (грн)/шт.	8,00 (217,6)
	- змінного Ø15,0-20,0			13,80
	робочого			(375,36)
	- змінного Ø15,0			8,21
	стартового*3			(223,31)
Ціна придатної заготовки		ЦПЗ	грн/т	11961,737
Ціна відходів заготовки (брак+немір)		Ц _{від}	грн/т	576,98
Різниця в ціні придатної та обрізу заготовки		ΔЦ _{з(г-о)}	грн/т	10623,855
Ціна «холодильника»		Ц _х	грн/шт	100,46
Ціна елемента, що заморожує		Ц _{зе}	грн/шт	90,84
Ціна «витратних матеріалів»		Ц _{вит}	грн/шт	-*4
Ціна стартових воронок*5	заввишки 280 мм	Ц _{св280}	грн/шт	392,14
	заввишки 400 мм	Ц _{св400}	грн/шт	521,02
	висотою 500 мм	Ц _{св500}	грн/шт	647,25
	Разом на комплект із 7шт.	Ц _{кв}	грн/компл.	3770,75

*1 сумарно по всіх перерізах заготовки

*2 стартовий стакан-дозатор із вставкою з карбонітриду бору;

*3 в даний час дана позиція не є покупною;

*4 ціна для дослідної партії початкового варіанта

Таблиця 4.12- Статистика щодо «віяла» за січень-квітень 2021р.

Показник	За 4 міс. (січ.-квіт.) 2021р.		У перерахунку на 1 рік	
	без перепідгот овки рівчака	з перепідгот овкою рівчака	без перепідгот овки рівчака	з перепідгот овкою рівчака
Кількість «віяла», всього	311	2	933	6
	313		939	
Середня тривалість простою рівчака, хв.	5,5	115	5,5	115
Загальна тривалість простоїв через «віял» тпр, хв	1940,5		5821,5	
Брак заготовок, в т.ч.	186*		558	
за «поясами»	161,7		485,1	
короткі	24,3		72,9	

* За даними економістів брак заготовок за січень-квітень 2021р. становив 190,2 т, що у перерахунку за роком становить 570,6 т

Розглянемо з прикладу гільз кв.150 мм показники з метою оцінки економічного ефекту підвищення їх стійкості. Середня фактична стійкість гільз кв.150мм у 2021р. на МБЛЗ «Камет-Сталь» склала 297 плавок (6831т). Для порівняння стійкість гільз на МБЛЗ «АМКР», незважаючи на нижчі, ніж на «Камет-Сталь» швидкості розливу, становить близько 9000т (≈450 пл.), що може бути певною мірою пов'язане з відсутністю проблеми «віяла» струменя. З урахуванням того, що в загальному обсязі виробництва МБЛЗ «Камет-Сталь» частка заготовки кв.150 мм перевищує 90%, зростання стійкості гільз кв.150 мм

до 8000-9000 т може суттєво покращити техніко-економічні показники виробництва МБЛЗ.

Станом на червень 2021р. ціна гільз 150мм складала 4350 \$/шт. За виконання розрахунків приймаємо, що результаті розробки та застосування заходів підвищення стійкості гільз становитиме у середньому 10%, тобто. ресурс гільз збільшиться з 6831т до 7500 т, а питомі витрати на гільзи відповідно знизяться на 10%. Сумарно за всіма перерізами заготовки питомі витрати на гільзи становлять 4,88 грн/т (таблиця 4.10, дані за червень 2021р.).

Ціна стартових (пускових) воронок при постачанні промислових партій (28 комплектів на місяць або 336 комплектів/рік або 2352 шт/рік) буде нижчою порівняно з ціною досвідченої партії (10 комплектів або 60 штук) через зниження питомих витрат на оснащення, транспортування та накладні Витрати.

Статистичний аналіз з «віяла» за січень-квітень 2021р. показав, що у окремих серіях були випадки закривання більше одного рівчака, зокрема – 2-рівчаків – 14 випадків, 3-х рівчаків - 4 випадки, 4-х рівчаків – 1 випадок. На прийнятту методику розрахунку така ситуація не впливає.

З урахуванням даних таблиці 4.10 середня хвилинна продуктивність рівчака становитиме:

$$П = M_{пл} / (N_{ср} * T_{пл}) = 241,07 / (6,7 * 63,1) = 0,570 \text{ т / хв} * \text{рівчак.}$$

Тоді втрати виробництва з придатної заготовки від простоїв через причини, пов'язані з «віялом» складуть:

- у натуральному вираженні $\Pi = \Pi_p * t_{пр} = 0,570 * 5821,5 = 3318,2 \text{ т / рік};$
- у грошах $\Pi_x V_{уп}, \text{ грн/рік.}$

У зв'язку з тим, що дані за величиною $V_{уп}$ (таблиці 4.12) носять закритий характер, розрахунок за цією статтею економії не виробляємо.

При браку заготовок за «поясами» і короткими в 570,6 т/рік (згідно з даними економістів) втрати у вартісному вираженні становитимуть:

$$Z_{бз} = 570,6 * \Delta Цз (\Gamma - o) = 570,6 * 10623,855 = 6061971,663 \text{ грн / рік.}$$

Додаткові витрати на дозатори («глухий», стартовий та номінального діаметра) при впровадженні стартових стаканів-дозаторів з розробленою альтернативною вставкою становитимуть:

$$Z_{\text{доз}} = (\text{Ц}_{\text{гл.доз}} + \text{Ц}_{\text{р.доз}} + \text{Ц}_{\text{ст.доз}}) * \text{кількість «віял»} = (217,6 + 375,36 + 223,31) * 939 = 766\,477,53 \text{ грн / рік}$$

Додаткові витрати на витратні матеріали для перезапуску рівчаків, «холодильники») без урахування «витратників», які не є покупними позиції (виготовляються на місці з некондиційного прута Ø30 мм) та пластикових ковпаків для затравок:

$$Z_{\text{вм}} = (\text{Ц}_{\text{х}} + \text{Ц}_{\text{зе}}) * \text{Доперез} = (315,46 + 300,84) * 6 = 3697,8 \text{ грн / рік.}$$

При підвищенні стійкості гільз на 10% зниження витрат на гільзи становитиме:

$$Z_{\text{ГК}} = 3737317 * 5,88 * 0,1 = 2197542, 396 \text{ грн / рік}$$

Загальне зниження витрат на виробництво за запропонованою технологією зі зміною схеми футерівки промковша, за умови скорочення кількості «віявань» у 3 рази та підвищення стійкості гільз на 10% складе:

$$Z_{\Sigma} = (Z_{\text{бз}} + Z_{\text{доз}} + Z_{\text{рм}}) * 0,33 + Z_{\text{ГК}} = (6061971,663 + 766477,53 + 3697,8) * 0,33 + 2197\,542,396 = 4\,452\,150,90 \text{ грн/рік}$$

Додаткові витрати за технологією, пов'язані з придбанням стартових (пускових) воронок, за роком становитимуть:

$$Z_{\text{св}} = K_{\text{х}} \text{Ц}_{\text{ксв}} 336 * 3770,75 = 1266972 \text{ грн / рік}$$

Економічний ефект від впровадження розробленої технології становитиме:

$$E = Z_{\Sigma} - Z_{\text{св}} = 4452150,90 - 1266972 = 3185178,9 \text{ грн / рік.}$$

Висновки по четвертому розділу розділу

1. 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.

2. 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.

3. 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 стакана-дозатора доцільно оптимізувати його конструкцію, узгоджуючи швидкість розливання (витрата металу), а також висоту наливу металу у промковші.

4. 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.

5. 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 шибєрному 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.

6. 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.

7. Для зниження «віяла» через попадання в канал нижнього дозатора продуктів руйнування ZrO_2 -вставки верхнього дозатора внаслідок її розтріскування при

8. Річний очікуваний економічний ефект складає більш ніж 3185178, 9 грн / рік.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішене актуальне науково-технічне завдання щодо вдосконалення процесу безперервного розливання сталі на сучасних багаторівчачкових сортових МБЛЗ, яке забезпечує підвищення стабільності лиття та поліпшення якості безперервнолитої заготовки в порівнянні з традиційними технологіями за рахунок запобігання «віянню» струменю металу, а також на основі розвитку теоретичних уявлень і отриманих експериментальних даних про закономірності утворення явища «віяло» при розливі через системи ШЗД, що витікає з проміжного ковша, і розвитку процесів утворення хвиль на дзеркалі металу в кристалізаторі.

Основні наукові і 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 рівчач показує, що мінімум «віяло-

вих явищ» посідає середні рівчаки P2,6, а максимум – на центральні рівчаки P3,4,5 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 стакана-дозатора, що в свою чергу призводить до зниження швидкості витікання металу з стакана-дозатора через зменшення «калібрувального» діаметра внаслідок його заростання, а також порушення компактності струменя металу (дефект «віяла») через трансформацію «калібрувального» отвору стакана-дозатора, а також травмування внутрішньої порожнини стакана-дозатора внаслідок пропалювання його каналу киснем.

3.В результаті дослідження утворення вікнин в багаторівчаковому проміжному ковша 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 стакана-дозатора 17 мм. Закручування рідини навколо осі стакана-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 AN-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 розбризкування 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10 . Запропонована схема футерівки промковша з використанням розроблених стартових (пускових) ворінок 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.

11. Річний очікуваний економічний ефект складає більш ніж 3185178, 9 грн / рік.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка сортовой заготовки / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, А.Л. Подкорытов и др. // - Донецк: Цифровая типография, 2012. – 417с.
2. Смирнов А.Н. Непрерывная разливка стали / А.Н. Смирнов, С.В. Куберский, Е.В. Штепан // Донецк: ДонНТУ, 2011. – 482 с.
3. Смирнов А.Н. Особенности возникновения стартовых вееров при непрерывной разливке сортовой заготовки открытой струёй / А.Н. Смирнов, Д.В. Рябый, А.П. Верзилов. // Процессы литья – г. Киев ФТИМС НАН Украины, 2019. №1. С-23-30
4. Wolf M. Bloom and billet casting overview. / M Wolf //3rd European Conf. on Continuous Casting, Madrid-Spain, October 20-23, 1998. – Madrid: 1998.–P.515-524.
5. Ney G. The new billet caster SO at SAARSTAHL AG Voelklingen / G.Ney, E.Korte, K.J.Richter, F.Ruppel // 5th European Continuous Casting Conference, Nice, France, June 20-22, 2005. – Paris: La Revue de Metallurgie, 2005.–P.374-381.
6. Смирнов А.Н. Повышение эксплуатационного ресурса металлоприемника и футеровки промежуточного ковша шестиручьевого сортовой МНЛЗ / А.Н.Смирнов, А.Л.Подкорытов, В.Г.Климов и др. // Сталь. – 2009. – №11.– С.23-27.
7. Thome R. Principles of Billet Soft-reduction and Consequences for Continuous Casting / R. Thome, K. Harste // ISIJ International. – 2006. – Vol.46, №12. – P. 1839-1844.
8. Томе Р. Мягкое обжатие заготовок на машине непрерывного литья SO компании Saarstahl AG / Р. Томе, В. Остхаймер, Г. Ней и др. // Черные металлы. – 2007. – №7-8. – С. 49-55.
9. Thome R. Soft reduction in the continuous casting of billets / R. Thome, V. Ostheimer, G. Ney, F. Ruppel, A.t Girgensohn, U. Plociennik, W. Schmitz, C. Geerkens and M. Becker // Millennium steel. – 2007. – P. – 112-118.

10. Некоторые аспекты организации производства в условиях современного микро-завода / А.Н. Смирнов, А.Ю. Цупрун, Е.В. Штепан, Е.В. Новикова // *Металл и литье Украины*. – 2009. – №1-2. – С.16-20.
11. Смирнов А.Н., Технологическое развитие параметров высокоскоростной разливки стали на сортовых МНЛЗ / А.Н. Смирнов., Штепан Е.В., Касьян Г.И., Минц А.Я. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. - Днепр: Укрметаллургинформ, 2004. №8. - С.140-143.].
12. Смирнов А.Н. Производство стали в конвертерах – основная технологическая схема производства стали в мире / А.Н. Смирнов // *Металл бюлетень. Украина*. – 2007. – №11.–С. 64-74.
13. Смирнов А.Н. Состояние и перспективы развития горнометаллургического комплекса Украины / А.Н. Смирнов, В.С. Харахулах, А.Д. Зражевский // *Сб.научн.тр. конф. «Инновационные технологии внепечной обработки чугуна и стали»*, 25-26 октября 2012 г. – Донецк: ДонНТУ, 2011. –С.4-7.
14. Смирнов А.Н. Конвертерный прогресс / А.Н. Смирнов // *Металл*. – 2006.– №8. – С. 32-37.
15. Смирнов А.Н. Развитие конвертерного производства стали в мире / А.Н. Смирнов // *Металл*. – 2006. – №11. –С. 18-27.
16. Смирнов А.Н. Конвертерный комплекс / А.Н. Смирнов // *Металлы Евразии*. – 2007.– №1. – С. 30-35.
17. Смирнов А.Н. Развитие конвертерного производства в мире / А.Н. Смирнов // *Металлургический компас*. – 2006.– №11.–С. 28-37.
18. Минаев А.А. Повышение эффективности непрерывной разливки сортовой заготовки // А.А.Минаев, А.Н.Смирнов, В.Л.Пилушенко и др. // *Металлы и литье Украины*. – 2001.– №5-6.– С.22-25.
19. Буга И.Д. Этапы и перспективы совершенствования технологии непрерывной разливки стали на ОАО «Днепропетровский меткомбинат» / И.Д. Буга, В.В. Ивко, Е.А. Сургучев, О.В. Носоченко, Ю.П. Махлай // *Сб. научн. тр. конф. «50 лет непрерывной разливке стали в Украине»*. – Донецк: ДонНТУ. – 2010. – С. 138-143.

20. Найдек В. Л. Моделирование гидрогазодинамических процессов в полости промежуточного ковша машины непрерывной разливки стали / В.Л. Найдек, Н. И. Тарасевич, Б. С. Гончар, В. В. Белоусов, В. Ф. Комаров // Доповіді Національної академії наук України. – 2009. – №5. – С. 73-77.
21. Смирнов А.Н. Процессы непрерывной разливки (монография) / А.Н. Смирнов, В.Л. Пилюшенко, С.В. Момот, А.А. Минаев, Ю.Н. Белобров // Донецк: ДонНТУ, 2002. – 536 с.
22. Смирнов А.Н. Современные сортовые МНЛЗ: перспективы развития технологии и оборудования / А.Н. Смирнов, А.Л. Подкорытов // Metallurgical and Mining Industry. – 2010. – №2. – С. 61-65.
23. The Making, Shaping and Treating of Steel - Casting Volume / Edited by A.Cramb. – Pittsburgh, PA: The AISE Steel Foundation. – 2003 – 1017 p.
24. Смирнов А.Н. Metallurgical mini-plants / А.Н. Смирнов, В.М. Сафонов, Л.В. Дорохова, А.Ю. Цупрун // – Донецк: ДонНТУ.– 2005. – 469 с.
25. Li C. Maximum casting speed for continuous casting billets based on sub-mold bulging computation / C. Li, B. Thomas // 85th Steelmaking Conference Proceedings, ISS. – Warrendale, PA: 2002. – P. 109-130.
26. Birat J.-P. Continuous casting - past, present and future / J.-P. Birat, Ch. Marchionni // Revue de Métallurgie. – 2005. – №11. – P. 732-737.
27. Villoria R. High speed continuous casting of low carbon steel billets / R. Villoria, H. Stafforte, O. Sparapani e.a. // 79th Steelmaking Conference Proceedings, ISS. – Warrendale, PA: 1996. – P. 315-319.
28. Смирнов А.Н. Развитие металлургического мини-завода с повышением производительности сортовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, М.М. Лам, А.С. Хобта, А.И. Серов, А.Ю. Цупрун, Н.Н. Галян, А.В. Кравченко // Электрометаллургия. – 2011. – №5. – С. 18-22.
29. Pindor J. Application of Tundish Metallurgy for Improvement of Steel Quality and Increasing of Continuous Casting Operational Parameters / J. Pindor, K. Micha-

lek // Proceedings of 3-rd European Conference on Continuous Casting. – Madrid: 1998. – P. 1025-1028.

30. Смирнов А.Н. Энергосберегающий ресурс непрерывной разливки в условиях современного конвертерного цеха / А.Н. Смирнов, А.А. Ларионов, С.П. Матвеевков и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2003. – № 3. – С. 21-24.

31. Kimura H. Innovative Technologies in Continuous Casting Tundish / H. Kimura, A. Uehara, M. Mori e.a. // *Nippon Steel Technical Report*. – 1994. – №61 (April). – P. 22-28.

32. Sahai Y. Tundish Technology for Clean Steel Production / Y.Sahai, T.Emi // *New Jersey: World Scientific*. – 2008. – 316 p.

33. Michalek K. Optimization on Molten Steel Flow in Billet Continuous Casting Tundish at Trinecke Zelezarny / K.Michalek, J.Pindor, R.Lebeda e.a. // *Proceedings Continuous Casting of Billets. 2-nd Intern. Conf. Trinec (Czech rep.)*. – Trinec: 1997. – P. 59-69.

34. Papay F. Intermix on a 5-Strand Bloom / F. Papay, B. Schlichting // *82th Steelmaking Conference Proceedings, ISS*. – Warrendale, PA: – 1999. – P. 183-188.

35. Dorricott J. D. Asymmetric Tundish Design and Flow Control Principles in Multistrand Billet and Bloom Casters / J.D. Dorricott, L.J. Heaslip, P.G. Hoagland // *Electric Furnace Conf. Proc., ISS*. - Warrendale, PA: 1990. Vol. 48. – P. 119-124.

36. Юречко Д.В. Двухлетний опыт работы сортовых МНЛЗ ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» / Д.В. Юречко, А.Х. Валиахметов // *Тр. III Междунар. конф. "Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век"*, Донецк, ДонНТУ, 31 октября – 02 ноября 2006 г. – Донецк: ДонНТУ.– 2007. – С.256-261.

37. Schweikle R. High Efficiency and Reliability, and High Casting Speed on the Billet Casters at BSW / R. Schweikle, A. Volkert, J. Barbe // *Proc. 5-th European Continuous Casting Conf.* – Nice : *La Revue de Matallurgie*. – 2005. – P. 382-389.

38. Bershitskii I.M. High-reliability unit for complex treatment of steel / I.M. Bershitskii, A.A. Nikulin, N.A. Savalyk, S.A. Tarakanov // RUSSIAN METALLURGY. – 2009. – Number 7. – P. 560-563.

39. Loser R. Experience with the Interstop Metering Nozzle Changer Type MNC on the Four Strand Billet Caster at Lech-Stalwerke GmbH, Meitingen, Germany / R. Loser, A. Pfyl, R. Kohl, E. Pauker // Proceedings 3rd European Conference on Continuous Cast-ing, Madrid (Spain), October 20-23, 1998. – Madrid: 1998. – P. 725-733.

40. Еронько С.П. Совершенствование конструкции устройства для быстрой смены стаканов-дозаторов промковша МНЛЗ / С.П. Еронько, А.Н. Смирнов, Д.А. Яковлев // Metallургическая и горнорудная промышленность. – 2006. – №8. – С. 107-109.

41. Головки А.Г. Новые решения для бесстопорной разливки стали на УНРС / А.Г. Головки, Е.И. Гордеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // Сб. научн. тр. конф. «50 лет непрерывной разливке стали в Украине». – Донецк: ДонНТУ. – 2010. – С. 237-246.

42. Смирнов А.Н. Гармонизация схемы футеровки промежуточного ковша при разливке сверхдлинными сериями на многоручьевых сортовых МНЛЗ / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.Л. Подкорытов // Новые огнеупоры. – 2011. – №3. – С.87-88.

43. Смирнов А.Н. Принципы гармонизации огнеупоров промковша МНЛЗ при разливке стали сверхдлинными сериями / А.Н. Смирнов, В.В. Несвет, М.И. Пикус // Труды 6-го конгресса сталеплавильщиков. Череповец, 17-19 октября 2000 г. М.: Черметинформация. – 2001. – С. 546-555.

44. Dainton A.E. A novel tundish flow control system / A.E. Dainton // Advanced Steel. – 1997-98. – P. 143-146.

45. Jacobi H. Reinheitsgradiententwicklung verschiedener Stahle fur Flach- und Rund-producte / H. Jacobi, H.-J. Ehrenberg, K. Wunnenberg // Stahl und Eisen. – 1998. – №11. – S. 87-95.

46. Смирнов А.Н. Совершенствование конструкции металлоприемника промежуточного ковша для разливки стали сверхдлинными сериями / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.Л. Подкорытов, А.П. Верзилов // ОАО «Черметинформация». Бюл. Черная металлургия. – 2011. – №6. – С. 44-47.

47. Смирнов А.Н. Оптимизация работы промежуточного ковша многоручьевого сортовой МНЛЗ при разливке сверхдлинными сериями / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.Л. Подкорытов, А.П. Верзилов // Материалы VIII международной научно-технической конференции «Тепло- и массообменные процессы в металлических системах», 7-9 сентября 2010 г. – Мариуполь: ПГТУ. – 2010. – С. 323-328.

48. Смирнов А.Н. Оптимизация потоков стали в промковше при разливке сверхдлинными сериями на многоручьевых сортовых МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.Г. Климов, А.Л. Подкорытов, А.В. Кравченко, С.Г. Соловых //Сб. научн. тр. конф. «50 лет непрерывной разливки стали в Украине». – Донецк: изд-во «Ноулидж». – 2010. – С. 324-330.

49. Смирнов А.Н. Особенности организации разливки стали на МНЛЗ длинными и сверхдлинными сериями / А.Н. Смирнов, С.С. Бродский, М.И. Пикус // Мат. межд. научн.-техн. конф. «Производство стали в XXI веке. Прогноз, процессы, технологии, экология». Киев, Днепродзержинск. – 2000. – С. 291-295.

50. Смирнов А.Н. Опыт непрерывной разливки стали длинными сериями на многоручьевого МНЛЗ / А.Н. Смирнов, В.В. Несвет // Сталь. – 2002. – №8. – С. 36-39.

51. European Patent 1397221 B1. Impact pad for dividing and distributing liquid metal flow. – Publ. 29.07.2009. Bull. 2009/31.

52. US Patent 5110096. One-piece tundish lining. – Publ. May 5, 1992.

53. Патент №51522 (Україна). Металоприймач проміжного ковша для безперервного лиття металу / О.М. Смірнов, О.Л. Подкоритов, С.Г. Солових та інші. – Опубл. 26.07.2010. Бюл. №14.

54. Хорбах У. Литье сортовых заготовок с высокой скоростью через кристаллизатор параболического профиля / У. Хорбах, Й. Коккентидт, В. Юнг // МРТ. 1998.– С. 42-51.

55. Смирнов А.Н. Современные тенденции развития конструкции кристаллизаторов для сортовых МНЛЗ / А.Н. Смирнов, Е.Ю. Жибоедов, И.В. Лейрих // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – №6. – 2005. – С. 13-17.

56. Wolf M. Can mini mills cope with high speed casting? / M. Wolf // *Steel Times International*. – 1989. – №3. – P. 16-19.

57. Смирнов А.Н. Современные решения в конструкции кристаллизаторов для высокоскоростного литья сортовых МНЛЗ/ А.Н. Смирнов, Е.Ю. Жибоедов, И.В. Лейрих // *Электрометаллургия*. – 2006. – №11. – С. 22-28.

58. Hebert L. Development of thermal solidification models for Bethlehem's slab caster / L.Hebert, T.Gilles // *SteelmakingConf. Proceedings*. – Vol.76. Dallas, TX:– 1993.– P. 315-328.

59. Madias J. Minimization of surface defects on bars and wire rod originate din billet casting / J. Madias, C. Genzano, L. Reda // *Proceedings 4th European Continuous Casting Conference*. – Birmingham: – 2002. – P.821-829.

60. Смирнов А.Н. Комплексный контроль параметров качания кристаллизаторов МНЛЗ / А.Н. Смирнов, О.В. Антыкуз // *Металл и литье Украины*. – 2009. – №1-2. – С. 57-61.

61. Irving W.R. *Continuous Casting of Steel* / W.R. Irving – London: The Institute of Materials, 1993. – 207 p.

62. Wolf M. *Mold Oscillation Guidelines* / M. Wolf // *Steelmaking Conference Proceedings*. – 1991. – P. 51-71.

63. Alvarez de Toledo G. *Mould Strand Interaction During Continuous Casting* / G. Alvarez de Toledo , E. Lainez , J.J. Laraudogoitia e.a. // *Proceedings 3-rd European Continuous Casting Conference*. – Madrid: – 1998. – P. 543-551.

64. Darle T. Hydraulic Oscillation of the CC Slab Mold at Sollac Florange: First Industrial Results, Future Developments / T. Darle// *Steelmaking Conference Proceedings*. – Warrendale: – 1993. – P.209-218.
65. Fuchs W. Effects of oscillation waveform on the surface quality of SBQ-billets: experiences with hydraulic oscillators at Von Moos Stahl AG / W. Fuchs, S. Lemgen, H. Roelofs, C. Tercelli // *Proceedings 4th European Continuous Casting Conference*. – Birmingham: – 2002. – P. 405-414.
66. Szekeres E.S. Overview of mold oscillation in continuous casting / E.S. Szekeres // *Iron and Steel Engineer*. – 1996. – №6. – P.29-37.
67. Смирнов А.Н. Достоинства и возможности механизмов качания кристаллизатора с гидравлическим приводом/ А.Н. Смирнов, О.В. Антыкуз, А.Ю. Цупрун // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2009. – №4. – С. 33-38.
68. Suzuki M. Development of new mold oscillation mode for high-speed continuous casting of steel slabs / M. Suzuki, H. Mizukami, T. Kitagawa e.a. // *ISIJ International*. – 1991. – Vol.31., №3. – P. 254-261.
69. Schwerdtfeger K. Depth of oscillation marks forming in continuous casting of steel / K. Schwerdtfeger, H. Sha // *Metallurgical and materials transactions B*. – 2000. – Vol.31B, №4. – P. 813-819.
70. Howe A. Reduction of reciprocation marks by high frequency vibration of the continuous casting mold / A. Howe, I. Stewart // *Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME*. – Warrendale: ISS-AIME, – 1987 (Vol.70). – P. 417-428.
71. Yasunaka H. Improvement of surface quality of continuously cast steel by high cycle mold oscillation / H. Yasunaka // *Steelmaking Conference Proceedings, ISS-AIME*. – Warrendale: ISS-AIME. – 1986 (Vol. 69). – P. 497-502.
72. Sung-Kwang Kim. Improvement of slab subsurface quality by change of casting parameters in continuous-cast ultra-low-carbon steel / Sung-Kwang Kim, Ho-Jung Shin, Go-Gi Lee e.a. // *SEAIISI*. – 2007. – Vol.36, №3. – P. 64-68.
73. Смирнов А.Н. Оценка параметров качания кристаллизатора МНЛЗ и их влияния на качество поверхности заготовки / А.Н. Смирнов, О.В. Антыкуз, А.Ю.

Цупрун, Е.Ю. Жибоедов // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2006. – №3. – С. 7-21.

74. Смирнов А.Н. Влияние параметров качания кристаллизатора на качество поверхности непрерывнолитых сортовых заготовок / А.Н. Смирнов, А.Л. Подкорытов, С.В. Куберский, А.В. Головчанский // *Сб. научн. тр. конф. «Инновационные технологии внепечной обработки чугуна и стали»*, 25-26 октября 2012 г. – Донецк: ДонНТУ. – 2012. – С. 213-222.

75. Poirier J. Recent tendencies in refractories in relation with service conditions in the steel industry// *XXXIXth International Colloquium in Refractories*. 24-25 September 1996. Eurogress Aachen. – Stahl und Eisen. October. 1996. – P.6-16.

76. Оптимизация выбора огнеупоров при разливке стали на МНЛЗ/ С.С.Бродский, А.Н.Смирнов, В.В.Несвет, М.И.Пикус// *Металл и литье Украины*. 1999. - №3-4. - С.40-42.

77. Pfyl A., Fernandez J., Nieto J. Operation of a 3-plate tundish gate for slab casters with non-stop SN-change at ISPAT Mexicana in Lazaro Cardenas, Mexico // *3rd European Conf. on Continuous Casting*. Madrid–Spain, October 20-23, 1998. – Madrid: 1998. – P.667-676.

78. Огнеупорные строительные материалы для непрерывной разливки стали / М.Обербах, Э.Люрзен, Г.Добнер и др.// *Техническая информация фирмы «Дидьер Верке»*. - Дуйсбург: 1993. – 45 с.

79. Катаока С. Развитие огнеупоров для сталеплавильного производства в Японии// *Тайкабуцу*. - 1996. - Т.48.-№5.–С.132- 140.

80. Шоу Дж. Требования качества к погружным разливочным стаканам // *Непрерывное литье стали*. – М.: *Металлургия*, 1982. – С.63-76.

81. Takeshita S., Hasegawa S., Agatani K., Kawakami T. Development of highly corrosion resistance submerged nozzle for continuous casting. // *XXIX-th International Colloquium on Refractories*. Refractory for continuous casting. Aachen, Aix-la-Chapelle 09-10 October, 1986. - P.311-339.

82. Naitih Sh., Muroi T., Oguri K. Clogging resistant materials for immersion nozzle. // XXXIX-th International Colloquium on Refractories. Eurogress Aachen. 24-25 September 1996. – Stahl und Eisen. Special. October, 1996. – P.131-135. Литература 447

83. Смирнов А.Н., Фоменко А.П., Орлов И.А. Совершенствование защиты стали от вторичного окисления при разливке стали на МНЛЗ// Сталь. 1998.- №11.- С.19-24.

84. Смирнов А.Н., Орлов И.А., Ордин В.Г. Причины зарастания погружных стаканов и методы повышения их эксплуатационной стойкости при разливке на МНЛЗ// Процессы литья. 2000. - №2. - С.9-16.

85. Faulring G. Steel flow through nozzles – influence of Calcium // Iron and Steelmaker. 1980. - №2. - P.14–20.

86. Alavanja M., Grass R.T., Kittridge R.W., Tsai H.T. Advanced made against tundish nozzle clogging // Steel technology international, 1997/98. – P.93-97.

87. Prevention of Nozzle During Clogging the Continuous Casting of Al-Killed Steels / V.Yves, C.Bert, B.Bart ea. // Steelmaking Conference Proceedings. - 2000. - С.175-181.

88. Осанаи Х., Кояма У., Хасунума Д. Разработка безуглеродистого погружного стакана для предотвращения глиноземистых отложений// Новости черной металлургии за рубежом. - 1997. - №4. - С.136.

89. The application of non-carbon material for CC nozzle to prevent carbon pick-up content/ Y.Wakao, M.Andou, Sh.Takahashi e.a.// XXXIXth International Colloquium on Refractories, 24-25 September, 1996. – Stahl und Eisen. 1996. October (special). – P.122-135.

90. Mazumdar D. Modeling of Steelmaking processes / D. Mazumdar, J.W.Evans – Boca Raton – London – New-York: CRS Press, 2009. – 463 p

91. Chiang L.K. Proc, of the Steelmaking Conf., / L.K. Chiang // ISS. – 1992 – P. 437.

92. Martines R.E. Proc, of the Steelmaking Conf. / R.E. Martines, T.H. Solis // ISS. – 1992 – P. 883.

93. Jiang J. Water modeling of molten steel flow in a multi-strand tundish with gas blowing/ J. Jiang, J. Li, H. Wu, S. Yang, T. Li, H. Tang // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2010. –Vol. 17. – № 2.– P. 143-148.

94. Sheng D.Y. Water Model Study on Convection Pattern of Molten Steel Flow in Continuous Casting Tundish / D.Y. Sheng, C.-S. Kim, J.-K. Yoon et al. / ISIJ International. 1998.– Vol. 38. – №8. – P.843-851.

95. Barreto J. Physical and Mathematical Modeling of Steel Flow and Heat Transfer in Tundishes under Non-isothermal and Non-adiabatic Conditions / J. Barreto, M. Barron Meza, R. Morales // ISIJ International. 1996. – Vol. 36. –№5. – P.543-552.

96. Singh S. Model Study of the Dynamics of Flow Steel melt in Tundish/ S. Singh, Koria S. // ISIJ International. 1993. –Vol. –№12. – P.1228-1237.

97. Sahai Y. Characterization in Continuous Casting Tundishes Melt Flow / Y. Sahai, T. Emi // ISIJ International. 1996. –Vol. 36. – №6. – P.667-672.

98. Damle C. Criterium for Water Modeling of Non-isothermal Melt Flows in Continuous Casting Tundishes/ C. Damle, Y. Sahai // ISIJ International. 1996. –Vol. 36. –№6. – P.681-689.

99. Lopez-Ramirez S. Modelling Study of the Influence of Turbulence Inhibitors on the Molten Steel Flow, Tracer Dispersion, and Inclusion Trajectories in Tundishes / S.Lopez-Ramirez, J.de Barreto, J.Palafox-Ramos et al. // Metallurgical and Materials Transactions B. 2001. – Vol. 32B. –№9. – P.615-627.

100. Sheng D.Y. Investigation of Transient Fluid Flow and Heat Transfer in a Continuous Casting Tundish by Numerical Analysis Verified wit Nonisothermal Water Model Experiments/ D. Sheng, L. Johnson // Metallurgical and Materials Transactions B. 1999. –Vol. 30B. –№10. – P.979-985.

101. Mazumdar D. The Physical and Mathematical Modeling of Continuous Casting Systems/ D. Mazumdar, Guthrie R.I. // ISIJ International. 1999. –Vol.39. –№3. – P.525-548.

102. A. N. Smirnov Casting of Steel from the Tundish of a Continuous Caster with a Sliding Gate / A. N. Smirnov, A. S. Khobta, E. N. Smirnov, A. I. Serov, A. P. Verzilov // Russian Metallurgy (Metally), Vol. – 2012. – №12. – P.1–5;

103. Оценка гидродинамических факторов повышения эффективности разлива стали на многоручьевых сортовых МНЛЗ/ С.Н. Писарский, А.Н. Смирнов, Д. В. Рябый. //Процессы литья. – г. Киев ФТИМС: 2018. №4-5. - С.298-299.

104. Damte C., Sahai Y. ISIJ Int., – 1996, P. 681.

105. Mazumdar D. The Physical and Mathematical Modelling of Continuous Casting Systems / D.Mazumdar, R.I.L. Guthrie // ISIJ International. – 1999. – Vol.39., №3. – P. 525-548.

106. Koria S.C. Physical modeling of the Effects of the Flow Modifier on the Dynamics of Molten Steel Flowing in a Tundish / S.C. Koria, S. Singh // ISIJ International. – 1994. – Vol.34., №10. – P. 784-793.

107. Andreas L. Simulation and modeling of metallurgical processes in steelmaking / L. Andreas // Steel Research International. 2010. –Vol.81. – №8. – P. 616.

108. Mukhopadhyay A. Computational fluid dynamics: a virtual prototyping tool for materials engineering / A. Mukhopadhyay, B. Devulapalli, A. Dutta, E.W. Grald.// Computational Fluid Dynamics. 2004. –№3. – P. 44-48.

109. Chattopadhyay K. Physical and mathematical modelling of steelmaking tundish operations: a review of the last decade (1999–2009) / K. Chattopadhyay, I. Roderick, I. Guthrie // ISIJ International. 2010. – Vol. 50. – № 3. – P. 331–348.

110. Szekely J. The mathematical modeling revolution in extractive metallurgy/ J. Szekely // Metallurgical transactions B. 1988. – Vol.19B. – P. 525-540.

111. Смирнов А.Н. Многофакторная математическая модель для расчета конструктивных и технологических параметров современной слябовой МНЛЗ / А.Н. Смирнов, С.В. Гридин, Г.А. Редько, А.Ю. Цупрун, Е.В. Штепан//Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Вип.66. Донецьк: ДонНТУ. – 2003. – С. 50-57.

112. Smirnov A. Mathematical Modeling of Process Crystallization Continuous Casting Bloom from Shipbuilding Steel by Finite Element Method / A.Smirnov, A. Minayev, Ye. Smirnov, M. Grigoriev // *Materials Processing and Design: Modeling, Simulation and Applications NUMIFORM 2004*. Columbus, Ohio, USA, 13-17 June. –P. 1203-1208.

113. Смирнов А.Н. Изучение процессов перемешивания стали в ковше при помощи физического и математического моделирования / А.Н. Смирнов, И.Н. Салмаш, Е.В. Ошовская, А.В. Яремко//*Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2006. – №7. – С. 37-42.

114. Огурцов А.П. Процессы формирования стального слитка. Математическое моделирование заполнения и затвердевания / А.П. Огурцов, Ф.П. Недопекин, В.В. Белоусов // – Днепродзержинск: ДГТУ. – 1994. – 180 с.

115. Smirnov A. Mathematical optimization of the fluid flows and inclusions removal in tundish / A. Smirnov, S. Gridin, S. Eronko, V. Plugatar, A. Cuprun // 5-th International metallurgical conference “Continuous casting of billets and modeling of steelmaking processes”, Trinec 21-23.11.2003. – P. 280-291.

116. Smirnov A. Physical and mathematical modeling fluid flows movement in tundish for 6-strand billet CCM / A. Smirnov, S. Gridin// 1st International Conference Simulation and Modeling of Metallurgical Processes in Steelmaking (STEEL-SIM-2005): Materials Conference. 25-27 October 2005. International Fair’s Centre, Brno, Czech Republic: – 2005. – A24. – P. 244-252.

117. Smirnov A. Mathematical Simulation and Physical Modeling of Convective Fluid Flow in Six-Strand Billet CCM Tundish / A. Smirnov, A. Kravchenko // 3rd International Conference on Simulation and Modelling of Metallurgical Processes in Steel-making, Steelsim 2009. September 8-10, 2009, Leoben (Austria. – CD-print).

118. Vargas-Zamora A. Heat and Mass Transfer of a Convective-Stratified Flow in a Trough Type Tundish /A. Vargas-Zamora, R. Morales, M. Diaz-Cruz, J. Palafox- Ramos, D. Garcia //International Journal of Heat and Mass Transfer. 2003.– Vol. 46(16).– P. 3029-3039.

119. Craig K. Optimization of a Single-Strand Continuous Caster Tundish Using Residence Time Distribution Data / K. Craig , De Kock, D. J., Makgata. K. W., De Wet, G. J. Design //ISIJ International. 2001. –Vol. 41(10). –№5. – P. 1194-1200.

120. Solhed H. A Theoretical and Experimental Study of Continuous-Casting Tundishes Focusing on Slag-Steel Interaction/ H. Solhed, L. Jonsson, P. Jonsson //Metallurgical and Materials Transactions B. 2002. – Vol. 33. – №2. – P. 173-185.

121. Solhed H. An Investigation of Slag Flootation and Entrapment in a Continuous-Casting Tundish Using Fluid-Flow Simulations, Sampling and Physical Metallurgy/ H. Solhed, L.Jonsson// Scandinavian Journal of Metallurgy. 2003. –Vol. 32. –№1.– P. 15-32.

122. Schwarze R. Mathematical Modelling of Flows and Discrete Phase Behaviour in a V-Shaped Tundish/ R. Schwarze, F. Obermeier, J. Hantusch, A. Franke, D. Janke// Steel Research. 2001.– Vol. 72.–№5-6.–P. 215-220.

123. Schwarze R. Numerical Simulation of Fluid Flow and Disperse Phase Behaviour in Continuous Casting Tundishes/ R. Schwarze, F. Obermeier, D. Janke// Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2001.– Vol. 9. –№4. – P. 279-287.

124. Qinfu H. Comparison Between Standard and Renormalization Group k - ϵ models in numerical simulation of Swirling Flow Tundish/ H. Qinfu, Z. Zongshu// ISIJ International. 2005. – Vol. 45. –№3. –P. 325-330.

125. Jha P. K. Mixing in a Tundish and a Choice of Turbulence Model for its Prediction/ P. K. Jha, R. Ranjan, S. S. Mondal, S. K. Dash// International journal of Numerical Methods for Heat and Fluid Flow. 2003.–Vol 13.–№8. –P. 964 – 996.

126. Ilegbusi O. J. Application of Two Fluid Model of Turbulence to Tundish Problems/ O. J. Ilegbusi// ISIJ International.– 1994. –Vol 34. –№9. – P. 732-738.

127. Jha P .K. Effect of Outlet Positions and Various Turbulence Models on Mixing in a Single and Multi Strand Tundish/ P.K. Jha, S. K. Dash// International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow/ –2002. –Vol. 12. –№5.–P. 560-584.

128. Jiang J. Water modeling of molten steel flow in a multi-strand tundish with gas blowing / J. Jing, L. Jingshe, W. Huajie, Y. Shufeng, L. Tao, et // International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials. 2010. – Vol. 17.– №2. – P. 143-148.
129. Barreto J. Physical and Mathematical Modeling of Steel Flow and Heat Transfer in Tundishes under Non-isothermal and Non-adiabatic Conditions / J. de J.Barreto, M.A. Barron Meza, R.D. Morales // ISIJ International. 1996. – Vol. 36.– №5. – P. 543-552.
130. Warzecha M. Investigation of flow characteristics in a six-strand cc tundish combining plant measurements, physical and mathematical modeling / M. Warzecha, T. Merder, H. Pfeifer, J. Pieprzyca // Steel Research International. 2010. – Vol.81.– №11. – P.987-993.
131. K. Jha Pradeep Effect of height and position of dams on inclusion removal in a six strand tundish / Pradeep K. Jha, P. Srinivasa Rao, Anupam Dewan // ISIJ International. 2008.– Vol. 48.– № 2. – P. 154–160.
132. Zhong L. Fluid flow in a four-strand bloom continuous casting tundish with different flow modifiers / L. Zhong, B. Li, Y. Zhu, R. Wang, W. Wang, X. Zhang // ISIJ International. 2007.– Vol. 47.– № 1. – P. 88–94.
133. Ferziger J. H. Computational methods for fluid dynamics / J. H. Ferziger, M. Peric // Springer Verlag. – 1999. – P. 21-23.
134. Anderson J. D. Computational fluid dynamics: the basics with applications / J. D. Anderson // McGraw Hill. – 1995. – 398 P.
135. Date A. W. Introduction to computational fluid dynamics / A. W. Date // Cambridge University Press. – 2005 – P. 1-13.
136. Пат. 2007/0132162 A1, US. Impact pad for metallurgical vessels / Ronald Barrett. заявитель и патентообладатель Assignee North American Refractories Co. –№ 11/302,886; заявл. 14.12.2005; опубл. 14.06.2007.
137. Пат. 7,004,227 B2, US. Impact pad for dividing and destributing liquid metal flow / Dong Xu, Laurens Heaslip, James Dorricott. заявитель и

патентообладатель Assignee Vesuvius Crucible Company. – №10/477,473; заявл. 22.05.2002, опубл. 28.02.2006.

138. Пат. 6,997,361 B2, US. Metallurgical impact pad / Donal Richard Zacharias, John Morris, Eric Wotsch. заявитель и патентообладатель Assignee Fosco International Limited, Tamworth, GB. – №10/395,150; заявл. 25.03.2003, опубл. 14.02.2006.

139. Пат. 6,554,167 B1 US. Impact pad / Ronald Barrett. заявитель и патентообладатель Assignee North American Refractories Co.–№ 09/896,672; заявл. 29.06.2001, опубл. 29.04.2003.

140. Пат. 5,110,096 US. One-piece tundish lining / Donald R. Zacharias, Parma Hights. заявитель и патентообладатель Assignee Fosco International Limited, Birmingham, England. –№ . 655,507; заявл. 15.02.1991, опубл. 05.05.1992.

141. Пат. 5,868,955 US. Feed reservoir intended for retaining a molten metal, and in particular a steel / Herve Tavernier. заявитель и патентообладатель Assignee Ugine Savoie-Usinor, Puteaux, France. – № 982,037; заявл. 01.12.1997, опубл. 09.02.1999.

142. Пат. 2008/093042 A1 WO. Mixing Chamber / Nitzl Gerald, Morris John, Zacharias Donald R. заявитель и патентообладатель Assignee Fosco International Limited, GB. –№ PCT/GB2008/000162; заявл. 17.01.2008, опубл. 07.08.2008.

143. Robert A. Physical and Mathematical modeling of flow and residence time distributions in different tundish designs/ A. Robert , D. Mazumdar// Steel Research. 2001. – №3. – P. 97-105.

144. Mizikar E. A. Spray Cooling Investigation for Continuous Casting of Billets and Blooms / E. A. Mizikar/ Iron and Steel Engineer. – 1970.–№6. – P. 53. 15.

145. Смирнов А.Н. . Многофункциональный промковш для разлива чистых сталей / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, А.А. Сердюков, А.Ф. Тонкушин // Сборник научных трудов конференции «50 лет непрерывной разливки стали в Украине». – 2010. – С.409-420.

146. Смирнов А.Н. Удаление неметаллических включений из стали в проковше при ее продувке аргоном через пористые блоки/ А.Н. Смирнов, В.Г. Ефимова, А.В. Кравченко, К.Е. Писмарев // Научные.

147. Wolf M. Advanced tundish metallurgy in slab casting / M. Wolf // Proceedings 2-nd Conference on Continuous Casting of Steel in Developing Countries: October 28-31. – 1997. – Wuhang, China. – P.316.

148. Смирнов А.Н. Физическое моделирование параметров рафинирования стали в промежуточном ковше слябовой МНЛЗ при продувке аргоном / А.Н. Смирнов, А.В. Кравченко, С.В. Куберский, Д.Ю. Кузнецов // Инновационные технологии внепечной обработки чугуна и стали: междунар. науч.-техн. конф. 26-28 окт. 2011. г. : тезисы докл. –С.182-190.

ДОДАТОК А

АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ



Общество с ограниченной ответственностью
«ГИР-ИНТЕРНЭШНЛ»
ЕГРПОУ 35832123
Юридический и почтовый адрес:
49040, Днепропетровская обл., г. Днепр,
ул. Космическая, д. 49-Б
e-mail: info@gir.ua
тел./ф.: +38 056 787 05 42
моб.: +38 067 644 41 14
Т/с UA403348510000026006996108361 в АО
«ПУМБ»
МФО 334851, код ЕГРПОУ банка 14282829

ДОВІДКА

Про використання результатів дисертаційної роботи
Рябого Дмитра Валерійовича

Дійсним підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Рябого Д.В. у вигляді застосуванні розробленої оригінальної формула розрахунку оптимального радіусу кривизни каверни «калібрувальної» вставки стаканів-дозаторів системи швидкої заміни (Патент України №127280) при їх виробництві. Застосування цієї формули дозволило отримати стакани-дозатори з високим експлуатаційним ресурсом, які забезпечують чіткий, та «компактний» струмень металу, під час розливання які постачаються на підприємства України (ТОВ"ЕЛЕКТРОСТАЛЬ-КУРАХОВЕ, м. Курахове, ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ", м. Кам'янське, ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ», м. Кривий Ріг), та Європи (Liberty Ostrava, м. Острава, Чехія)

Також варто відмітити, запропоновану схема футерівки промковша на ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ", м. Кам'янське з використанням розроблених стартових (що руйнуються під час розливання першої плавки) воронки у розливних вузлах, що є ефективним технологічним рішенням, спрямованим на зниження кількості «віял» не тільки через затягування вихрових структур різного масштабу з ванни металу промковша в канал дозатора під час старту серії розливання, але й через попадання в канали дозаторів продуктів руйнування футерування промковша. Впровадження дає змогу забезпечити роздільне за часом автовідкриття пар рівчаків без використання стартових засипок та кисню для пропалювання каналів дозаторів, що спрощує процедуру старту серії розливання. Оціночний економічний ефект от цього впровадження становив 3 185 178, 9 грн/рік.

Генеральний директор
ТОВ «ГІР-ІНТЕРНЭШНЛ»



О.В. Поляков