

До спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.03 при Інституті
промислових та бізнес технологій
Українського державного
університету науки і технологій,
м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента Костецького Юрія Віталійовича
на дисертаційну роботу Рябого Дмитра Валерійовича «Стабілізація витікання
струменю металу сортової МБЛЗ за рахунок удосконалення умов роботи
стакана-дозатора», яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата
технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних та кольорових
металів та спеціальних сплавів.

1. Актуальність теми дисертації.

Конкуренція на ринках металопродукції та необхідність задовольняти
більш жорсткі вимоги споживачів стимулюють металургів до розробки і
впровадження нових технологічних рішень, спрямованих на підвищення якості
металопродукції.

В останні два десятиліття спостерігається значний прогрес в
конструкційному оснащенні і технологічному оформленні машин безперервного
лиття заготовок. Це дозволило виробникам адаптувати процес безперервного
лиття до різних технологічних побудов, які покликані забезпечити відповідність
поточним вимогам ринку металопродукції. Високі вимоги до якості
безперервнолитих заготовок, зростаюча частка складних марок сталі і прагнення
до збільшення швидкості розливання зі стабільною якістю заготовки
обумовлюють необхідність поглибленого вивчення процесів, що відбуваються
під час розливання сталі на МБЛЗ. Зокрема, в зоні переливання сталі з
проміжного ківша в кристалізатор МБЛЗ з метою визначення умов оптимізації
руху потоків рідкого металу в металевій ванні, запобігання захопленню ними
шлакових включень та зменшення інтенсивності заростання внутрішньої
порожнини стаканів-дозаторів. Не менш важливим чинником при цьому є
забезпечення зменшення питомих витрат на розливання, в тому числі за рахунок
збільшення стійкості стаканів-дозаторів і серійності розливання.

Дисертаційна робота Рябого Д.В. присвячена актуальній для сучасної
металургії проблематиці – дослідженню особливості течії металу на ділянці
проміжний ківш-кристалізатор сортової МБЛЗ та динаміки заростання стаканів-

дозаторів систем швидкої зміни дозаторів. Дисертаційна робота має чітко визначена практичне спрямування на пошук і наукове обґрунтування удосконалення конструкції вставки стакан-дозатора сортової МБЛЗ та корекції параметрів технології розливання, щоб забезпечити зменшення втрат металу, пов'язаних із заміною стакан-дозатора через порушення компактності струменю металу, що витікає. Дане дослідження є безмовно актуальними та своєчасними, а його результати становлять науковий та практичний інтерес.

Додатковим показником актуальності теми дисертаційної роботи є її відповідність тематиці науково-дослідних робіт, які виконувалися у Фізико-технологічному інституті металів і сплавів Національної академії наук України. Робота Рябого Д. В. є узагальненням наукових результатів, отриманих автором в період з 2017 р. по 2020 р. у якості виконавця держбюджетних науково-дослідних робіт «Розробка наукових основ створення нового покоління високоефективних мультифункціональних МГД проміжних ківшів для МБЛЗ металургійних мікрозаводів» (Державна тема №0117U002689, від 21.03.2017) та «Розробка наукових і технологічних основ електромагнітного переливу металу з проміжного ківша у кристалізатор МБЛЗ малонапорним струменем» (Державна тема № 0120U100134 від 24.01.2020 р.).

2. Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі Рябого Д. В. отримали подальший розвиток уявлення стосовно виникнення і розвитку ефекту розбризкування рідкого металу під час високошвидкісного розливання стали відкритим струменем на сортових МБЛЗ з використанням системи швидкої зміни стаканів-дозаторів. Рябим Д. В. було встановлено, що незадовільне розливання металу та необхідність заміни стакан-дозатора на інший, виникає внаслідок утворення настилів (заростання) на внутрішній поверхні порожнини 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.

На підставі результатів промислових дослідження «віялових» явищ під час високошвидкісного розливання сталі на сортовій МБЛЗ уперше обґрунтовані спостережувані на практиці закономірності утворення дефекту лиття типу «віяло», що дозволило надалі за рахунок системного підходу запропонувати низку технологічних рішень задля протидії даної проблеми.

Завдяки виконаному фізичному та математичному моделюванню процесів руху металу в порожнині стаканів-дозаторів автором було з'ясовано, що в умовах розливання сталі відкритим струменем на багатострумковій МБЛЗ на початку розливання серії металу, під час якої застосовуються верхні стакани-

дозатори діаметрами 19,0-21,0 мм і нижні стакани-дозатори діаметром 18,0-19,5 мм для набору швидкості розливання, доцільно застосовувати нижні стакани-дозатори з калібрувальними вставками без закруглення. Це дозволить знизити ймовірність заростання каналу нижнього стакану-дозатора неметалевими включеннями вогнетривкого походження. Також автором визначено, що під час розливання серії і збільшення діаметра калібрувальної вставки верхнього стакану-дозатора та 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) слід застосовувати нижні стакани-дозатори, калібрувальна вставка яких буде мати округлення в місці стику з верхнім стаканом-дозатором.

Розроблена формула розрахунку оптимального радіусу кривизни каверни «калібрувальної» вставки для нижніх стаканів-дозаторів, які найбільш часто використовуються на підприємствах металургійної галузі, що мінімізує ймовірність осідання на внутрішній поверхні порожнини «калібрувальної» вставки нижнього стакану-дозатора неметалевих утворень, а також забезпечити умови для отримання компактного струменя металу, що розливається через стакан-дозатор, впродовж всього періоду його експлуатації.

Вперше в металургійній практиці, автором були розроблені, виготовлені та опробовані вітчизняні «калібрувальні» вставки для нижніх стаканів-дозаторів із композиційного матеріалу, що складається з вихідних компонентів BN і B_4C , а також «вторинного» нітриду бору з ромбовидною кристалічною ґраткою, що утворюється при азотуванні B_4C в процесі реакційного спікання в атмосфері азоту.

3. Практична цінність дисертаційної роботи

Практична цінність дисертаційної роботи Рябого Д.В. полягає у запропонованій новій схемі футерівки проміжного ківша з використанням розроблених стартових воронки у розливних вузлах, що є ефективним технологічним рішенням, спрямованим на зниження кількості «віялових струменів» не лише через перешкодження затягуванню вихрових структур різного масштабу з ванни металу проміжного ківша в канал дозатора, але і через обмеження попадання в канали дозаторів продуктів руйнування футерівки проміжного ківша та цирконової вставки верхніх дозаторів. Окрім того, запропонована схема забезпечує роздільне за часом автовідкриття пар розливальних струмків без використання стартових засипок і кисню для пропалювання каналів дозаторів, що помітно спрощує процедуру старту.

Великий потенціал та перспективу промислового впровадження мають розроблені і випробувані «калібрувальні» вставки для нижнього (змінного) стакану-дозатора. Серед яких вставки базового складу, у яких за рахунок

змінення радіусу кривизни каверни вдалося мінімізувати розвиток несиметричних циркуляційних потоків, та стартові дозатори з нетиповим хімічним складом «калібрувальної» вставки (BN і B4C), які відрізняються значно меншим заростанням порожнини неметалевими включеннями і, як наслідок, проявами «віялового» струменя.

Очікуваний економічний ефект від запропонованих автором заходів становить більш ніж 3185178, 9 грн/рік.

Беззаперечний практичний інтерес являє розроблені та запропоновані автором принципи і методики моделювання гідродинамічної картини руху розплаву під час розливання крізь швидкозмінні стакани-дозатори на багатострумковій сортовій МБЛЗ, які можуть бути використані під час подальших досліджень з розробки нових видів вогнетривких виробів для високопродуктивних МБЛЗ та оптимізації технології розливання. Вони також можуть бути корисними у якості освітнього матеріалу в процесі підготовки фахових спеціалістів металургійної галузі.

4. Достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи

Обґрунтованість представлених у дисертаційній роботі Рябого Д.В. наукових положень, висновків і рекомендацій є результатом комплексного підходу до вирішення поставлених наукових задач, на основі фундаментальних положень теорії теплообміну, теплопровідності, гідродинаміки, термодинаміки, фізики нерівноважних процесів та теорії металургійних процесів.

В ході виконання роботи автор використовував визнані методи математичного аналізу, розрахунків і моделювання, чисельні методи розв'язання диференційних рівнянь з частковими похідними (методи скінчених різниць та скінчених елементів). Залежності були отримані на основі загальноновизнаних уявлень щодо механізмів металургійних процесів, фізичних законів, з урахуванням положень теорії подібності та розмірностей. Обчислювальні експерименти з дослідження теплофізичних і гідродинамічних процесів проводилися на персональних комп'ютерах.

Експериментальні та лабораторні дослідження, що виконані в умовах ФТІМС НАНУ та ПрАТ «Камет-Сталь», проведені з використанням методу планування експерименту, сертифікованих засобів контролю та лабораторного обладнання. Наукові положення, висновки і рекомендації автора узгоджуються зі загальноприйнятними положеннями фізики та теорії металургійних процесів.

Точність представлених у роботі результатів і залежностей є достатньою для їх подальшого практичного використання.

5. Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в опублікованих працях.

Основні результати і положення дисертації викладені в 11 публікаціях, в тому числі: у восьми статтях у наукових фахових періодичних виданнях, двох тезах доповідей на науково-практичних конференціях, одному патенті України. (6 статей опубліковано в спеціалізованих наукових виданнях, що відповідають переліку МОН України, 2 – у зарубіжних наукових виданнях, у тому числі одна входить до наукометричної бази SCOPUS).

Перелік публікацій, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації та у повній мірі відображають основні положення, наукові результати та висновки роботи дисертанта.

6. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності

Дисертаційна робота Рябого Дмитра Валерійовича складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку цитованих джерел, який містить (148 найменування, та 1 додаток. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 157 сторінок, містить 39 рисунків та 28 таблиць.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета і завдання дисертаційного дослідження, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрита наукова новизна роботи та її практична значимість, зазначено особистий внесок здобувача та зв'язок роботи з науковими програмами та темами, наведена інформація щодо публікацій, запровадження основних результатів роботи, структури і обсягу дисертації.

У першому розділі наведено аналітичний огляд щодо сучасних технологій безперервного розливання сортової заготовки і тенденцій їх розвитку, та наведено характеристику другого технологічного переливання сталі між проміжним ківшом та кристалізатором на сортових МБЛЗ, а також розглянуті переваги та недоліки різних схем дозування металу. Відзначені конструкційні та експлуатаційні особливості сучасних систем дозування металу, а також зазначені найбільш поширені системи для дозування металу під час розливання відкритим струменем на сортовій МБЛЗ, та представлено розгорнутий аналіз системи дозування металу.

У другому розділі автором надані дані щодо фізичних та математичних моделей, застосованих для моделювання процесів витікання струменя рідкого металу на ділянці стакан-дозатор-кристалізатор при розливанні відкритим струменем, комплексного моделювання утворення вікнино-подібних явищ при переливі металу з проміжного ківша в кристалізатор з використанням систем швидкої зміни дозаторів («ШЗД») та моделювання зносу футерівки проміжного ківша, що призводять до заростання каналу стакана-дозатора, а також залежність цього зносу, від турбулентного переміщення металу.

У другому розділі автор також наводить результати співставлення

результатів фізичного моделювання та комп'ютерного моделювання, виконаного у пакеті ANSYS, що реалізує метод кінцевих елементів (МКЕ) у межах модуля Flotran, який відображає CFD (Computerized Fluid Dynamics).

У розділі розглянуто узагальнення результатів математичного моделювання гідродинамічних, теплофізичних та масообмінних процесів, що мають місце під час високошвидкісного розливання сталі на сортовій МБЛЗ, та описана узагальнена стратегія комп'ютерного моделювання на підставі якої здійснювали моделювання в процесі дослідження.

У третьому розділі автор розглянув гідродинамічні аспекти поведінки розплаву під час високошвидкісного розливання з застосуванням швидкозмінних стаканів-дозаторів та закономірності виникнення дефекту лиття типу «віяло». Зокрема, увага була приділена визначенню частотного розподілу виникнення дефекту типу «віяло» на 7-ми струмковій МБЛЗ ПАТ «Камет-сталь» впродовж серії розливання металу, як по окремих струмках, так і по періоду серії розливання, марочному сортаменту, швидкості розливання і конструкції проміжного ківша.

У даному розділі також наведені результати проведених автором досліджень з вивчення впливу зносу футерівки проміжного ківша на процес виникнення явища «віяло» струменя в ході розливання серії та питання вікниноутворення в проміжному ківші, яке призводить до затягування неметалевих включень у порожнину стаканів-дозаторів та їх заростання, і як наслідок цього утворення «віяла» струменя.

Також за допомогою комп'ютерного моделювання, було вивчена динаміка витікання сталі з нижнього та верхнього стаканів-дозаторів різних діаметрів з заокругленням, та без нього, що дало змогу отримати уявлення відносно впливу конфігурації «калібрувальної» вставки на заростання її порожнини та формування струменя металу.

У четвертому розділі увага приділена розроблянню елементів і схем футерівки проміжного ківша для запобігання утворенню «віяла» струменя металу у ході розливання. Ґрунтуючись на результатах хімічного аналізу відкладень, який показав, що в них міститься близько 12-15% MgO , автором було запропоновано проводити перед розливанням спеціальну підготовку проміжного ківша з ущільненням та розгладжуванням торкрету шару, після його нанесення.

Також у цьому розділі, автор навів дані щодо робіт з розроблення «стартових» стаканів-дозаторів на основі BN і B_4C для старту розливання серії металу на МБЛЗ з метою досягнення зменшення відсорткування за поясними дефектами заготовки. При цьому були розроблені, виготовлені і опробувані в промислових умовах дослідні зразки «калібрувальної» вставки стакана-дозатора. Виконані дослідження показали, що застосування стаканів-дозаторів з альтернативним хімічним складом, в першу чергу, дозволяє зменшити

ймовірність розвитку дефектів струменя типу «віяла» через зменшення взаємодії калібрувальної вставки стакан-дозатора з продуктами плавки.

Також у розділі наведені результати дослідження характеру зносу гільзи кристалізатора високошвидкісної сортової МБЛЗ у процесі розливання відкритим струменем. Зокрема представлені дані щодо пошкоджуваності гільз кристалізаторів сортової МБЛЗ при розливанні в промислових умовах.

Ще один етап промислових досліджень був спрямований на досягнення гідродинамічної стабілізації на старті серії та зменшення кількості виникнення «віяла» шляхом використання розроблених автором «пускових» (стартових) воронок проміжного ківша та схеми футерівки проміжного ківша з даними воронками. Розроблені матеріали та схема їх розташування забезпечує запобігання затягуванню вихрових структур різного масштабу з ванни рідкого металу проміжного ківша в канали верхнього та нижнього стаканів-дозаторів та перешкоджають потраплянню в канали дозаторів продуктів руйнування футерівки проміжного ківша, а також інших частинок.

Завершується розділ пропозиціями щодо вдосконалення та оптимізації технології розливання.

У цілому слід зазначити, що у представленій до захисту дисертаційній роботі задачі дослідження сформульовані достатньо чітко і вирішуються коректно та послідовно. Текст дисертації характеризується логічним і зрозумілим викладенням наукових матеріалів дослідження. Робота оформлена відповідно до існуючих норм.

Підтверджена промисловим випробуванням ефективність розроблених в роботі методів, новизна, обґрунтованість та практична цінність отриманих результатів, а також відповідність поставлених задач зробленим висновкам дають підстави зробити висновок, що дана дисертаційна робота є в цілому закінченим дослідженням.

Зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

7. Загальні зауваження до дисертаційної роботи.

До тексту дисертації та автореферату є такі зауваження і запитання:

1. У розділі 2.1 формули для критеріїв Вебера та Рейнольдса містять помилки. Зокрема в формулі для критерію Вебера швидкість повинна бути у квадратному ступені, а у формулі для критерію Рейнольдса навпаки;
2. На рис. 2.10, 3.19, 3.24 шкала швидкостей не має позначення розмірності.
3. У розділі Висновки у висновку 11 вказана величина економічного ефекту, проте з формулювання не зрозуміло від чого і в наслідок чого

він виникає;

4. У другому пункті наукової новизни слід звернути увагу на коректність використання терміну «вкраплення вогнетривкого походження», а також дещо коригувати текст усього пункту для покращення його розуміння. У пункті 3 наукової новизни слід більш чітко визначити, що саме вкладається у формулювання «розширено уявлення щодо мінімізації ймовірності осідання... продуктів плавки»;
5. На сторінці 24, в абзаці 3 ТОВ «Електросталь» м. Курахове класифіковано як міні-завод, хоча за прийнятою класифікацією відноситься більше до міді-заводів, ніж до міні. Така класифікація металургійних підприємств малих форм наведено, наприклад, у роботі Металургійні міні-заводи: Монографія/Смірнов О.М., Сафонов В.М., Дорохова Л.В. Цупрун А.Ю. Донецьк: Норд-Прес, 2005. - 469с.;
6. У розділі 2.1 *«Розробка фізичної моделі та методики моделювання витікання сталі на ділянці стакан-дозатор-кристалізатор»* для проведення холодного моделювання автором були застосовані цирконієві («калібрувальні») вставки стакан-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. Автору слід було зазначити ступінь заростання НВ, або зношення порожнини «калібрувальної» вставки в процентному виразі відносно стану вставки до початку експлуатації окрім класифікації по часу експлуатації;
7. Розділ 2.3 в якому представлені результати дослідження зношування типових зон торкрет шару проміжного ківша шляхом розташування експериментальних зразків у різні зони проміжного ківша та імітації розливання протягом 15 хвилин. Доречно було підкріпити опис дослідження не тільки рисунками зразків до, та після розливання, а також надати схему розміщення зразків у відповідних зонах проміжного ківша;
8. В таблиці 3.2 відображені результати аналізу прояву «віяла» струменя МБЛЗ-1,3 для проміжних ківшів місткістю 30 і 40 т. У підсумку до цієї таблиці автор зазначає, що чинник конструкції проміжного ківша не впливає на частоту утворення «віял» струменя. Проте з даних таблиці видно, що фактична різниці прояву дефекту струменю типу «віяла» на проміжних ківшах на 40 т проміжних ківша більша ніж на 30 т ківшах. Можливо автору треба було дослідити вплив феростатичного тиску на прояв дефекту «віяло»;
9. На рисунку 3.5 «Частотний розподіл «віял» за тривалістю розливання плавки» відображена шкала сумарної кількості віял по МБЛЗ-1 та

МБЛЗ-3, яка не є інформативною, бо являє собою відсоткову суму проявів «віял» по двох МБЛЗ;

10. В дисертаційній роботі, у таблиці 3.9 приведено результати дослідження зносу футерівки в різних зонах промківша, але не зазначена кількість цих досліджень для кожної зони футерівки;
11. На сторінці 83 автор робить припущення, що «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», але не дає обґрунтування цього припущення. Автору треба було більше приділити увагу посиленій конструкції верхнього стакан-дозатора з огляду на те, що не на всіх металургійних підприємствах є змога починати розливання серії металу «автостартом», тобто відбувається обов'язкове пропалювання рівчака киснем;

Слід зазначити, що зроблені опонентом зауваження та поставлені питання, перш за все, є показником цікавості до дисертаційної роботи. Зазначені зауваження в цілому не впливають на суть, загальні висновки, наукову новизну і практичну цінність дисертаційної роботи Рябого Д.В. Наукова обґрунтованість, достовірність положень та висновків якої не викликає сумнівів. Оформлення рукопису в цілому відповідає встановленим вимогам. Дисертація написана коректною технічною мовою. Результати роботи викладені в логічній послідовності з повним і наочним поданням матеріалів, ілюстрованих малюнками і таблицями. Стиль викладення результатів забезпечує доступність їх сприйняття. Зміст автореферату є ідентичним основним положенням та результатам, які наведено в дисертації. Висновки дисертації відповідають тексту, є логічними і послідовними, та повністю відповідають виконаним дослідженням. Результати дисертаційної роботи можуть бути рекомендовані до використання на відповідних металургійних заводах України та за кордоном, а також у навчальному процесі під час підготовки фахівців зі спеціалізацією «металургія чорних металів».

8. Загальний висновок про відповідність дисертації вимогам

Дисертаційна робота Рябого Д.В., яку представлено на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, є завершеним науковим дослідженням, загальні висновки дисертаційної роботи відповідають її змісту та представляють отримані результати. Дисертаційна робота за змістом повністю відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Аналіз новизни й значущості наукових і практичних результатів, висновків і рекомендацій дозволяють стверджувати про відповідність дисертаційної роботи вимогам пунктів 9, 11, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України №656 від 19.08.2015 р. та №1159 від 30.12.2015 р., та нормативним документам Міністерства освіти і науки України.

Наукові і прикладні результати дисертації достатньою мірою висвітлені у 11 наукових роботах. Кількість, обсяг та рівень видання публікацій відповідають вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України. Аналіз особистого внеску автора роботи вказує на високий ступінь самостійності виконання досліджень та публікування їх результатів.

Таким чином, на основі представленого вище оцінювання в цілому дисертаційної роботи Рябого Д.В. «Стабілізація витікання струменю металу сортової МБЛЗ за рахунок удосконалення умов роботи стакан-дозатора» вважаю, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Рябий Дмитро Валерійович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент,
провідний науковий співробітник
відділу фізико-металургійних проблем
електрошлакових технологій
Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України (м. Київ),
доктор технічних наук, доцент

 Юрій КОСТЕЦЬКИЙ

Підпис Костецького Юрія Віталійовича засвідчую:
Учений секретар Інституту електрозварювання
ім. Є.О. Патона НАН України, к.т.н.



Ілля КЛОЧКОВ