

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

кандидата технічних наук, доцента Єфімової Вероніки Гаріївни
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.

Безперервне розливання сталі є невід'ємним елементом сучасної технології
отримання конкурентоспроможної продукції і широко використовується
передовими світовими та вітчизняними металовиробниками. Дисертаційна
робота спрямована на обґрунтування та вдосконалення технологічних
параметрів процесу безперервного розливання сталі відкритим струменем з
застосуванням систем швидкої заміни дозаторів, які надають вирішальний вплив
на ефективність технології, як з точки зору якості одержуваних заготовок, так і
продуктивності використовуваних у технологічній схемі МБЛЗ.

Тема дисертаційної роботи пов'язана з галузевими програмами та
відповідають пріоритетним напрямкам розвитку науки та техніки України.
Дисертаційні дослідження проводилися в рамках держбюджетної науково-
дослідної роботи (Державна тема № 0120U100134 від 24.01.2020 р.), в якій автор
брала участь як виконавець.

В даний час в Україні працює 5 сортних високопродуктивних МНЛЗ, що
мають 32 рівчака і здатних розливати більше 7 млн. т сталі на рік..

Тому представлена дисертаційна робота є дуже актуальною, а отримані в
ній результати мають великий науковий інтерес та практичну значимість.

2. Наукова новизна отриманих результатів.

1. Автор надав розвиток уявлення про виникнення і розвиток ефекту
розбризування металу при високошвидкісному розливанні стали відкритим
струменем на сортних 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 ковша, коли рівень металу в ньому максимальний ($\approx 40\%$ випадків у перші 10 хв). У наступні періоди (11-20) та (21-30) хв. частота «віяла» знижується.

2. Вперше було з'ясовано, що в умовах сучасного розливання сталі відкритим струменем на багаторівчачовій МБЛЗ на початку розливання серії металу, при якій застосовуються верхні стакани-дозатори діаметрами 19,0-21,0 мм і нижні стакани-дозатори діаметром 18,0-19,5 мм для набору швидкості розливання, доцільно застосовувати нижні стакани-дозатори з калібрувальними вставками без закруглення. Це дозволить знизити ймовірність заростання каналу нижнього стакану-дозатора неметалевими вкрапленнями вогнетривкого походження. Однак у ході розливу серії збільшення діаметра калібрувальної вставки верхнього стакану-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. У дисертаційній роботі розширено уявлення щодо мінімізації ймовірності осідання на внутрішній порожнині «калібрувальної» вставки нижнього стакану-дозатора продуктів плавки, а також для забезпечення компактності струменя металу через стакан-дозатор. Розроблена оригінальна формула розрахунку оптимального радіусу кривизни каверни «калібрувальної» вставки для нижніх стаканів-дозаторів, які найбільш часто використовуються на підприємствах металургійної галузі.

4. Здобувачем вперше в науковій літературі були розроблені, виготовлені, та опробувані 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 решіткою, отриманої при азотуванні B_4C в процесі реакційного спікання в атмосфері азоту.

3. Практична цінність дисертаційної роботи

Наукове та практичне значення мають розроблені, вироблені і випробувані автором «калібрувальні» вставки для нижнього (змінного) стакану-дозатора як базового складу, де за рахунок змінення радіусу кривизни каверни вдалося мінімізувати розвиток несиметричних циркуляційних потоків, а також за рахунок впровадження стартових дозаторів з нетиповим хімічним змістом «калібрувальної» вставки (BN і B_4C), що значно зменшує заростання їх порожнини відкладеннями неметалевих включень і як наслідок проявів «віялового» струменя.

Беззаперечний практичний і науковий інтерес представляє розроблені та запропоновані автором принципи і методики моделювання гідродинамічної картини руху розплаву при розливанні через швидкозмінні стакани-дозатори при розливанні сталі на багаторівчачовій сортовій МБЛЗ, які 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 процесі в металургійній галузі.

Велику практичну цінність має, запропонована схема футерівки проміжного ковша з використанням розроблених стартових воронок у розливних вузлах, яка є ефективним технологічним рішенням, спрямованим на зниження кількості «віялових струменів» за рахунок стабілізації гідродинамічної картини в порожнині проміжного ковша під час його наповнення. Застосування саморуйнівних стартових воронок дозволяє уникнути затягування вихрових структур різного масштабу з ванни металу проміжного ковша в канал дозатора, та мінімізувати попадання в канали дозаторів продуктів руйнування футерівки проміжного ковша.

Крім того, запропонована схема футерівки з застосуванням стартових воронок дозволяє не тільки досягнути позитивного результату з точки зору удосконалення технології, а також і отримати економічний ефект від запропонованих заходів. Річний очікуваний економічний ефект складає більш ніж 3185178, 9 грн / рік.

4. Достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій є результатом використання в роботі сучасних методів фізичного та математичного моделювання, фізичної обґрунтованості та коректності запропонованих методик, перевірки одержаних результатів різними методами, в тому числі експериментальними дослідженнями та промисловим випробуванням розроблених технічних рішень.

Здобувачем в виконаній роботі використовувалися визнані в науці методи математичного аналізу і моделювання, чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь з окремими похідними (методи скінчених елементів) для рішення завдань гідроаеромеханіки, тепло- та масообміну. Обумовлені залежності були отримані на основі фізичних законів з урахуванням теорії подібності та розмірностей, що забезпечує їх використання в широкому діапазоні умов. Обчислювальні експерименти з дослідження теплофізичних і гідродинамічних процесів проводилися на персональних комп'ютерах за допомогою програмного пакету ANSYS. Експериментальні та лабораторні дослідження, що виконані в умовах ФТІМС НАНУ та ПрАТ «Камет-Сталь», проведені з використанням методу планування експерименту, сертифікованих

засобів контролю якості продукції та лабораторного обладнання.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертації, спираються на великий матеріал фізико-математичного моделювання та його аналіз, мають достатньо високий ступінь наукової обгрунтованості і не викликають сумнівів. Автор дисертації правильно сформував мету і завдання своєї дисертаційної роботи, які повністю виконув в ході виконання роботи.

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

Основні результати дисертації викладені в 11 публікаціях, в тому числі: 8 статтях в наукових журналах, 2 тез доповідей на науково-практичних конференціях, 1 патенту України. (6 статей опубліковано в спеціалізованих наукових виданнях, що відповідають переліку МОН України, 2 – у зарубіжних наукових виданнях, у тому числі 1 з праць 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 з висновками по кожному, загальних висновків, списку використаних джерел, що містить 148 найменування, та 1 додаток. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 157 сторінку (зокрема містить 39 рисунків та 28 таблиць).

У вступі обгрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, необхідність удосконалення умов роботи стакана дозатора за рахунок оптимізації технологічних процесів безперервного розливання сталі відкритим струменем. Сформульовані мета і завдання дисертації, визначені об'єкт, предмет і методи дослідження, розкрита наукова новизна роботи та її практична значимість, відзначено особистий внесок здобувача та зв'язок роботи з науковими програмами та темами, наведена інформація щодо публікацій, запровадження основних результатів роботи, структури і обсягів дисертації.

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

розгорнутий аналіз системи дозування металу.

У другому розділі *«Основні моделі, методики і методи дослідження»* увага присвячена розробці фізичних та математичних моделях для моделювання процесів витікання струменя на ділянці стакан-дозатор-кристалізатор при розливці відкритим струменем, комплексного моделювання утворення вікнино-подібних явищ при переливі металу з проміжного ковша в кристалізатор за допомогою систем швидкої зміни дозаторів («ШЗД») та моделювання зносу футерівки проміжного ковша, що призводять до заростання каналу стакана-дозатора, а також залежність цього зносу, від турбулентного переміщення металу.

Визначено, що прояв порушень компактності витікання струменя металу (дефект «віяла»), слід зв'язувати з процесами, що протікають при заростанні внутрішніх порожнин цирконієвих вставок «стакана-дозатора» в процесі розливання. Це призводить до зміни характеру витікання. При цьому порушується симетричність витікання металу, що в свою чергу виступає передумовою для виникнення збурень на поверхні металу в кристалізаторі, і як наслідок призводить до утворення наплесків і набризків сталі на стінки кристалізатора.

У другому розділі автор також наводить підтвердження результатів фізичного моделювання за рахунок моделювання на математичній моделі, який було виконано у пакеті ANSYS, що реалізує метод кінцевих елементів (МКЕ) в рамках модуля Flotran, який відображає CFD (Computerized Fluid Dynamics).

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

Також автором надано узагальненні висновки по розділу, за результатами створення математичної моделі з урахуванням гідродинамічних, теплофізичних та масообмінних процесів, що мають місце під час високошвидкісного розливання сталі на сортовій МБЛЗ, та описана узагальнена стратегія для чисельного моделювання на підставі якої здійснювались чисельні експерименти в процесі дослідження.

У третьому розділі *«Моделювання характеру поведінки розплаву під час високошвидкісної розливки з застосуванням швидкозмінних стаканів-дозаторів»* дисертантом розглядаються гідродинамічні аспекти струменевих течій, під час високошвидкісної розливки з застосуванням швидкозмінних стаканів-дозаторів, вивчені закономірності виникнення дефекту лиття типу «віяло». Увага була приділена, закономірностям прояву «віяла» металу на 7-ми рівчakovій МБЛЗ ПАТ «Камет-сталь» впродовж серії розливання металу залежно від рівчака періоду розливання серії, а також марочному сортаменту, та швидкості

розливання і конструкції проміжного ковша.

Автор навів результати досліджень спрямованих на вивчення впливу зносу футерівки проміжного ковша на процес утворення явища «віяло» струменя в ході розливання серії, та дослідження спрямоване на вивчення питання вікниноутворення в проміжному ковші, яке призводить до затягування неметалевих включень у порожнину стаканів-дозаторів, їх заростання і як наслідок утворення «віяла» струменя.

У дисертації за допомогою програмного забезпечення, було вивчена динаміка витікання сталі з нижнього та верхнього стакана-дозатора різних діаметрів з заокругленням, та без нього, що дало змогу отримати уявлення про вплив конфігурації «калібрувальної» вставки на процеси заростання її порожнини, та формування струменя металу.

У четвертому розділі *«Розробка елементів і схем футерівки проміжного ковша для зниження «віяла»*, автор приділив увагу розробці елементів і схем футерівки проміжного ковша для зниження «віяла» струменя металу у ході розливання. Виходячи з хімічних аналізів відкладень, який показав, що в них міститься близько 12-15% MgO, здобувачем було запропоновано проводити спеціальну підготовку проміжного ковша, що полягає в ущільненні та розгладжуванні торкрету шару, після його нанесення.

Особлива увага здобувачем в даному розділі присвячена розробці «стартових» стаканів-дозаторів на основі BNC для старту розливу серії металу на МБЛЗ з метою зниження відсорткування за поясними дефектами заготовки. Автором були розроблені, виготовлені і опробувані в промислових умовах дослідні зразки «калібровочної» вставки стакана-дозатора. Виконані дослідження показали, що застосування стаканів-дозаторів з альтернативним хімічним складом, в першу чергу, дозволяє знизити ймовірність розвитку «стартових віяла», що пов'язано з помітним зниженням взаємодії калібрувальної вставки стакана-дозатора з продуктами плавки.

Автор наводить результати дослідження характеру зносу гільзи кристалізатора високошвидкісної сортової МБЛЗ у процесі розливання відкритим струменем. В даному розділі досліджували пошкоджуваність гільз кристалізаторів сортової МБЛЗ при розливанні в промислових умовах заготовок.

Одним із вагомих досліджень виконаних у даному розділі, є виконані автором промислові дослідження спрямовані на гідродинамічну стабілізацію розливу на старті серії та зниження кількості «віяла» за допомогою розроблених «пускових» (стартових) воронок проміжного ковша, та запропонована схема футерівки проміжного ковша з розробленими пусковими воронками. Розроблені матеріали та схема їх розташування забезпечує запобігання затягування вихрових структур різного масштабу з ванни металу проміжного ковша в канали верхнього та нижнього стакана-дозатора, та створюють мови для перешкоджання потрапляння в канали дозаторів продуктів руйнування

футерівки промковша, а також різних технологічних частинок.

Недоліки відносно змісту та результатів роботи.

До недоліків відносно змісту та результатів роботи слід віднести наступне:

1. В панукті «**Практичне значення отриманих результатів**», автор стверджує, що запропонована ним схема футерівки з використанням пускових воронок дозволяє знизити кількості «віялових струменів» через попадання в канали дозаторів продуктів руйнування футерівки проміжного ковша та цирконової вставки верхніх дозаторів. Але, руйнування «калібровочної» вставки верхнього стакана-дозатора відбувається насамперед під час пропалювання рівчака під час старту серії, або при його перезапуску. Виходячи з наведених наданих в дисертаційній роботі, запропоновані автором стартові воронки дозволяють налагодити старт серії «автостартом» рівчаків без його пропалювання, що робить це ствердження недоцільним. Що стосується перезапусків рівчаків під час розливу серії, то за рахунок запропонованих саморуйнівних а не стаціонарних воронок, при використанні цієї схеми футерування немає інструментаріїв впливу на цей аспект.
2. У розділі «3.2 Дослідження характеру руйнування типових зон зносу футерівки проміжного ковша внаслідок руху циркуляційних потоків, що сприяють заростанню стакана-дозатора неметалевими включеннями» автором недостатньо повно висвітлено механізм зношування футерівки та затягування неметалевих включень у порожнину стаканів-дозаторів, їх заростання та, як наслідок, утворення «віяла» струменя металу.
3. У дисертаційній роботі не чітко показано вплив поверхневого натягу поверхнево –активної плівки розплаву на розвиток вікнини
4. При виконанні дослідів, які відображені в п 3.3. «Дослідження утворення вікнино-подібних явищ при переливанні металу з проміжного ковша в кристалізатор у процесі безперервного розливання сталі», не повною мірою описано механізм затягування шлакових частинок покривного шлаку у порожнину стакана-дозатору.
5. У розділі 4.2 наведені результати дослідження динаміки утворення поясних БЛЗ через віяловий струмінь, виходячи з яких видно, що за проаналізований період спостерігається незначне зростання (на 0,007 %) утворення віялового струменя порівняно з попереднім періодом. Наведене значення дорівнює статистичній похибці.
6. В останньому абзаці на сторінці 108 автор робить висновок, що витік сталі із стакана-дозатора носить нестабільний характер, що зазначено на рисунку 3,25 , але не наводить критеріїв цієї оцінки.

Загальний висновок.

Зазначені зауваження не знижують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи Рябого Д.В. В цілому, вона за своїм рівнем, об'ємом та оформленням повністю відповідає вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: є Дисертаційна робота Рябого Д.В., яку представлено на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, є закінченою науковою роботою, яка виконана на актуальну тем, включає новизну методичних та науково-технічних рішень, які витікають з достовірних експериментальних даних. Загальні висновки дисертаційної роботи повністю відповідають її змісту та представляють одержані результати. Оформлення рукопису в цілому відповідає встановленим ВАК України вимогам. Дисертація написана коректною технічною мовою.

Дисертаційна робота Рябого Дмитра Валерійовича «Стабілізація витікання струменю металу сортової МБЛЗ за рахунок удосконалення умов роботи стакан-дозатора» відповідає вимогам постанови 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 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» до кандидатських дисертацій, а її автор заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів (136-металургія).

Офіційний опонент,
доцент кафедри фізичної хімії
КПІ імені Ігоря Сікорського, к.т.н.

Вероніка ЄФІМОВА

Підпис Єфімової Вероніки Гаріївни засвідчую:

