

До спеціалізованої вченої ради
Д 08.084.03 при Національній
металургійній академії України
м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4

ВІДГУК

офіційного опонента

доктора технічних наук, доцента Костецького Юрія Віталійовича
на дисертаційну роботу Комарова Василя Федоровича «Удосконалення методу видалення неметалічних включень впливом на процеси переносу в розплаві у порожнині проміжного ковша», яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і 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 технологій, спрямованих на підвищення якості металопродукції. Одним з важливих показників, що визначає кінцеві споживчі властивості плаского прокату є рівень забрудненості металу неметалевими включеннями. Сучасні ефективні сталеплавильні технології передбачають реалізацію заходів, спрямованих на забезпечення чистоти металу за неметалевими включеннями, не тільки під час позапічної обробки, але і на етапі розливання сталі. Зараз переважна більшість листового прокату отримується з використанням безперервно литих слябів. На машинах безперервного розливання заготовок (МБРЗ) завдання з рафінування металу від неметалевих включень вирішують у проміжному ківші. Найбільш поширеними заходами є секціонування порожнини проміжних ківшів розділовими перегородками та продування металу інертним газом за допомогою спеціальних продувних пристроїв.

Незважаючи на численні дослідження, що присвячені вивченню процесів видалення неметалічних включень, до теперішнього часу однозначно не визначені оптимальні параметри і умови рафінування сталі від неметалічних включень для будь-якого проміжного ківшу МБРЗ. Вибір та оптимізація геометричних параметрів проміжних ківшів, параметрів внутрішніх елементів, визначення параметрів продування розплаву інертним газом носить переважно емпіричний характер. Відповідно для кожної МБРЗ необхідно проводити значний

об'єм досліджень. С цієї точки зору, визначення узагальнених закономірностей гідродинамічних процесів у проміжних ківшах та їх вплив на видалення неметалевих включень є вкрай важливим завданням. Кількісні оцінки зміни розподілу неметалічних включень в ході рафінування сталі в проміжних ковшах вельми нечисленні. Науковий опис процесів рафінування рідкого металу від неметалевих включень у різних умовах залишається актуальним питанням для фахівців.

Тому питання, розглянуті в дисертаційній роботі Комарова В.Ф., і спрямовані на дослідження гідродинаміки течій розплаву в ванні проміжного ковша, визначення раціональних конструктивних параметрів перегородок, конструктивних параметрів каналних протяжних фурм, режимів продувки аргоном та кількісну оцінку впливу зазначених чинників на результати рафінування сталі від неметалічних включень в проміжному ковші машин безперервного розливання заготовок є безмовно актуальними та своєчасними, становлять науковий та практичний інтерес.

Додатковим показником актуальності теми дисертаційної роботи є її відповідність тематиці науково-дослідних робіт, які виконувалися в Донецькому національному університеті імені В. Стуса. Дисертаційна робота Комарова В. Ф. являє собою узагальнення наукових результатів, які отримано автором за період з 2001 р. по 2014 р. у якості виконавця держбюджетних тем 01-1вв/26 (номер держреєстрації 0101U005373) «Моделювання гідродинамічних та тепломасообмінних процесів в проміжному ковші»; 04-1вв/26 (номер держреєстрації 0104U002157) «Чисельне моделювання гідродинамічних і теплофізичних процесів в проміжних ковшах різної конфігурації»; 07-1вв/26 (номер держреєстрації 0107U001466) «Математичне моделювання гідродинамічних та тепломасообмінних процесів при обробці металу в проміжному ковші»; 12-1вв/26 (номер держреєстрації 0112U002699) «Енергозбереження при розливці сталі».

2. Наукова новизна отриманих результатів.

У дисертаційній роботі Комарова В. Ф. отримав подальший розвиток метод моделювання процесів переносу в проміжному ківші МБЛЗ на основі теорії суцільних середовищ шляхом врахування бульбашкового продування розплаву інжекцією газової фази безпосередньо в його об'єм в околі продувального блоку та використання еквівалентних ефективних перетинів для граничних умов на ділянках надходження та витоку сталі. Це дозволило виконати моделювання в усьому діапазоні режимів продування, що являли інтерес, при непорушені умов

наближення суцільного середовища, дотриманні необхідних витрат аргону та актуальної витрати металу крізь промковш, і, як результат, отримати нову інформацію щодо теоретичних уявлень про процес очищення металу від неметалевих включень.

Завдяки запропонованому в роботі оригінальному методу виявлення характерних зон течії та обчисленню середньої величини кінетичної енергії, а також енергії турбулентного руху сукупно та по окремих зонах, що дозволяє оцінювати час перебування розплаву в проміжному ковші та приповерхневому шарі, отримана нова інформація з теорії струменевих течій, що розвиваються в обмеженому просторі,.

На підставі результатів дослідження гідродинамічних процесів у проміжному ковші МБЛЗ уперше обґрунтоване спостережуване на практиці підвищення забрудненості металу неметалевими включеннями під час перехідних режимів, коли в об'ємі рідкого металу не сформовані стабілізовані циркуляційні потоки.

Уперше визначено параметри та залежність максимально припустимих режимів дії на розплав від комбінації інтенсивності циркуляції розплаву, ступеня його турбулізації та інтенсивності бульбашкової продувки в проміжному ковші через критерій інтенсивності процесів взаємодії розплаву з покривним шлаком, який враховує величини кінетичної енергії та енергії турбулентного руху в приповерхневому шарі розплаву. Це дозволяє забезпечити умови ефективної асиміляції неметалічних включень покривним шлаком проміжного ковша при збереженні механічної стабільності межі «метал – шлак» і всього шлакового покриву та низьку ймовірність затягування шлаку в об'єм розплаву.

У роботі отримали подальший розвиток підходи до дослідження фізичних процесів у замкнених об'ємах металургійних агрегатів, зокрема у проміжному ковші МБРЗ, завдяки запропонованому способу визначення параметричних моделей процесу на основі знання про характерні зони об'єму досліджуваного агрегату та їх інтегральні параметри, що визначаються з розв'язання рівнянь механіки суцільних середовищ. Побудовані у такий спосіб параметричні моделі на відміну від поширених підходів, що використовують ситуативне відокремлення ділянок металургійного агрегату (комірок ідеального змішування та витіснення), дають краще розуміння внутрішньої динаміки розплаву за конкретних умов, а також дозволяють досліджувати складні просторово-розвинені процеси, коли неможливо визначити розмежування зон поширеними на практиці способами.

3. Практична цінність дисертаційної роботи

Практична цінність дисертаційної роботи Комарова В.Ф. полягає у виявленні закономірностей впливу геометричних параметрів вбудованих елементів на структуру потоків металу у проміжному ковші МБРЗ в процесі обробки продувкою аргоном та без неї, а також визначенні впливу режимів продування і параметрів багатоканальної поперечної донної фурми на формування газогідродинамічних потоків в проміжному ковші.

Беззаперечний практичний інтерес являє визначення умов поєднання режимів продувки, параметрів багатоканальної поперечної донної фурми і геометричних параметрів вбудованих елементів, а також параметрів розташування фурми та вбудованих елементів, що забезпечують формування режимів течії з зонами зворотної циркуляції, які покращують рафінування рідкого металу та його гомогенізацію перед надходженням до кристалізаторів.

Розроблено унікальне програмне забезпечення для чисельного моделювання гідродинамічних потоків в приймальній секції проміжного ковша МБРЗ при перехідних режимах розливання (заміна проміжного ковша, перша і остання плавки в серії).

Застосування розробленої технології рафінування металу в проміжному ковші МБРЗ на підставі визначеного в роботі поєднання режимів продувки, параметрів багатоканальної поперечної донної фурми і геометричних параметрів вбудованих елементів, а також параметрів розташування фурми та вбудованих елементів, що забезпечують формування необхідних режимів течії, має забезпечити ефективне зменшення загальної забрудненості литого металу від вторинних неметалічних включень в 2 рази з практично повним видаленням включень розміром понад 30 мкм.

Основні положення технології перевірені в умовах ПАТ МК «Азовсталь» (м. Маріуполь) під час безперервного розливання слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70 на експериментальному варіанті проміжного ковша, що був обладнаний дослідною донною фурмою з просторово орієнтованими каналами, яка забезпечувала необхідний бульбашковий режим продування. Розроблена технологія забезпечила зменшення забрудненості металу неметалевими включеннями – загальний індекс забрудненості безперервнолитих слябів неметалевими включеннями для дослідного металу був на 52% нижче, ніж для порівняльного, отриманого за стандартною технологією. Кількість крупних неметалевих включень зменшилась. Відсоток включень розміром менше 10 мкм в загальній масі становив на порівняльному металі – 43.9%, на дослідному металі – 68.9%; Відсоток включень розміром понад 30 мкм в загальній масі включень

становив для порівняльного металу – 29.0%. У дослідному металі вони були відсутні.

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.

Обґрунтованість представлених у дисертаційній роботі Комарова В.Ф. наукових положень, висновків і рекомендацій є результатом комплексного підходу до вирішення поставлених наукових задач, на основі фундаментальних положень теорії теплообміну, теплопровідності, гідро- та газодинаміки, термодинаміки, фізики нерівноважних процесів та технології розливання металів. В роботі використовувалися визнані методи математичного аналізу і моделювання, чисельні методи розв'язання диференціальних рівнянь з окремими похідними (методи скінчених різниць та 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. Експериментальні та лабораторні дослідження, що виконані в умовах ФТІМС НАНУ та ПАТ МК «Азовсталь», проведені з використанням методу планування експерименту, сертифікованих засобів контролю якості продукції 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.

Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи досить повно висвітлені в 35 наукових працях, з яких 1 монографія, 8 робіт в фахових виданнях (6 статей опубліковано в наукових фахових виданнях, що відповідають переліку МОН України та 2 – у фахових закордонних наукових

виданнях, що включені до наукометричної бази SCOPUS), 7 статей у збірниках наукових праць. Результати дисертаційної роботи були обговорені на 19 фахових науково-технічних конференціях та науково-методичних конференціях.

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 Комарова Василя Федоровича складається з вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел, що містить 131 найменування, та 4 додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 171 сторінку (зокрема містить 47 рисунків та 16 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, 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 наведено аналітичний огляд пов'язаних з темою роботи наявних досліджень з використання проміжного ковша як агрегату в якому можливе додаткове позапічне рафінування для видалення вторинних неметалічних включень та підвищення якості сталі, що розливається. Представлено огляд особливостей конструкції проміжного ковша і пов'язаних з ним технологічних процесів і заходів. Виявлені існуючі проблеми і завдання з додаткової обробки сталі на стадії проміжного розподільного пристрою. Надано порівняльний аналіз поширених на практиці підходів до моделювання та дослідження процесів в проміжному промковші, визначено їх недоліки та напрямки вдосконалення методу дослідження залученням інформації, що отримується при розв'язанні системи рівнянь механіки суцільних середовищ.

У другому розділі наведені результати дослідження щодо вибору параметрів і припустимого діапазону режимів дії на розплав, за яких не повинно спостерігатися прогнозованого погіршення умов роботи промковшу через надмірну турбулізацію або виникнення негативних явищ на межі розділу «метал – шлак», визначено умови забезпечення дослідного бульбашкового режиму продувки при дотриманні умов повного виведення з розплаву сукупного об'єму газової фази через шар шлаку. Це дозволило зробити певні припущення щодо моделювання і виконати вибір складових моделі, що охоплює процеси, які

становлять об'єкт дослідження дисертаційної роботи для подальшої можливості дослідження сукупних процесів в проміжному ковші та аналізу впливу досліджуваних факторів на перебіг видалення неметалічних включень в промковші. У розділі розглянуто узагальнення математичної моделі гідродинамічних, теплофізичних та масообмінних процесів, що мають місце під час додаткової дії на структуру потоків у розплаві та описана узагальнена стратегія для чисельного моделювання на підставі якої здійснювались чисельні експерименти в процесі дослідження.

У третьому розділі автор розглянув гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ківшу залежно від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів. Увага приділена пасивному формуванню структури течій та впливу конфігурації вбудованих елементів на вимушену конвекцію в порожнині промковша. Аналіз результатів моделювання підтвердив ефективність застосування обмежуючої турбулентності вставки «турбостоп» та виявив недоліки типової конструкції. Також показано умови, за яких можна інтенсифікувати процес асиміляції вторинних неметалічних включень, які потрапляють у промковш з новими порціями сталі або утворюються у ньому. Для цього за результатами моделювання запропоновані альтернативні вбудовані елементи з похилими стінками, що менше пригнічують циркуляційний рух в промковші при збереженні ефективності пригнічення турбулентності. Також у розділі за результатами моделювання та лабораторних досліджень визначені гідродинамічні чинники погіршення якості металу, що отримується під час перехідних режимів роботи промковша та їх вплив на забрудненість готової сталі за результатами вимірювань.

У четвертому розділі розглядаються гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша під дією бульбашкового режиму продування. Увага приділена аналізу впливу продувки аргоном на характер вимушеної конвекції в порожнині промковша при поєднанні продувки з облаштуванням промковша вбудованими елементами. У розділі наведені результати дослідження щодо вибору параметрів і припустимого діапазону режимів продувки аргоном, за яких не повинно спостерігатися погіршення умов роботи проміжного пристрою через надмірну турбулізацію або виникнення негативних явищ на межі розділу «метал – шлак». Визначені умови сукупного збільшення інтенсивності циркуляційних процесів та розосередженої турбулізації розплаву з переносом зони максимальної інтенсифікації процесів в приповерхневу область контакту зі шлаком для забезпечення можливості видалення дрібних фракцій вторинних неметалічних включень. Також у розділі

наводяться результати експериментальної перевірки в умовах виробництва з визначенням індексів забрудненості порівняльного та експериментального металу різними типами включень. Підсумовується розділ пропозиціями щодо вдосконалення та оптимізації технології.

Слід відзначити, що у представлена до захисту дисертаційній роботі задачі дослідження чітко сформульовані і вирішуються коректно та послідовно. В цілому дисертація відрізняється логічним викладенням наукових матеріалів дослідження і в цілому оформлена відповідно до існуючих норм.

Підтверджена промисловим випробуванням ефективність розроблених в роботі методів, новизна, обґрунтованість і практична цінність отриманих результатів, їх достовірність, а також відповідність поставлених задач зробленим висновкам дають підстави зробити висновок про закінченість дисертації в цілому.

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 «Практичне значення отриманих результатів» в пункті 3 зазначається, що виявлене поєднання чинників, що забезпечують формування режимів течії з зонами зворотної циркуляції, забезпечує «позитивний ефект рафінуванню рідкого металу і гомогенності параметрів розплаву». Вважаю, що таке формулювання є не зовсім коректним через невизначеність терміну «позитивний ефект», а також незрозумілість того, про яке рафінування йде мова. Вочевидь мається на увазі рафінування від неметалевих включень.
2. На рисунку 1.1 (стор. 25) позиції 1 і 8 описані некоректно з технічної точки зору. Так, позиція 1 за прийнятою термінологією має назву «футерівка шлакового поясу», а позиція 8, за аналогією з позицією 4, є «пристроєм» для продування, а не «системою».
3. Є також деякі зауваження щодо оформлення. Наприклад, до формул 1.1, 2.3, 2.4 не надано опис позначень змінних та констант відповідно до вимог. А у формулі 2.13 на вказані розмірності величин.
4. На сторінці 34 автор вказує схему процесу видалення включень з металу у проміжному ковші з шести етапів. Проте, скоріше за все, наведений перелік слід розглядати не як схему (послідовність), а лише як перелік процесів, які складають сутність загального процесу видалення

неметалевих включень. Або надати обґрунтування зазначеної їх послідовності.

5. У дисертації на сторінці 42 вказується, що футерування стін проміжного ковша МБЛЗ складається з 2-х шарів, які виконані з основних або нейтральних вогнетривів. Проте далі у дужках зазначається, що 1-й і 2-й шар футерівки виконано з шамотної цегли, яка відноситься до кислих вогнетривів.
6. Рисунок 3.1 на сторінці 73, що відображає співставлення картини потоків рідкої фази у проміжному ковші, які отримані різними методами дослідження, недостатньо інформативний і не має достатніх пояснень, що ускладнює аналіз наведених даних.
7. У розділі 3.2 наведені результати дослідження впливу внутрішньої конфігурації ковша на гідродинамічні процеси в ньому. В процесі порівняння структури течії за різної конфігурації треба було кількісно оцінити розміри визначених зон течії, що надало б змогу отримати кількісні характеристики для порівняння.
8. У розділі 3.3 дисертації для оцінки швидкості руху неметалевих включень в об'ємі нерухомого металу автор використовує формулу Стокса, яка, як відомо, добре працює лише для твердих неметалевих включень і показує найкраще співпадіння між експериментальними і розрахунковими даними для включень розміром менше 10 мкм. Внаслідок цього, використаний підхід не забезпечує однакової точності оцінок для всього спектру типів і розмірів неметалевих включень.
9. У формулі 3.7 використано коефіцієнт β , який характеризує газову фазу, але не зрозуміло, як можна визначити його значення.
10. На сторінці 102 автором зроблені висновки стосовно інтенсивності коливання поверхні рідкої ванни за різних умов продування, але не пояснена методика її вимірювання.
11. У розділі 4.4 автор пише, що було проведено порівняльний аналіз рафінування металу від різних неметалевих включень шляхом порівняння індексів рафінування. Проте результатів саме для індексу рафінування не наведено. Варто також було більш детально проаналізувати вплив пропонованих заходів на повноту видалення різних неметалевих включень.
12. У роботі автором запропоновано критерій інтенсивності взаємодії розплаву з покривним шлаком, який дозволяє прогнозувати інтенсивність асиміляції неметалевих включень. Як даний критерій

враховує особливості асиміляції шлаком включень різного типу і розміру?

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 Комарова В.Ф. Наукова обґрунтованість, достовірність положень та висновків якої не викликає сумнівів. Дисертаційну роботу виконано на хорошому науково-технічному рівні. Оформлення рукопису в цілому відповідає встановленим ВАК України 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 наведені 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 для використання у навчальному процесі під час підготовки фахівців зі спеціалізацією «металургія чорних металів».

8. Загальний висновок про відповідність дисертації вимогам

Дисертаційна робота Комарова В.Ф., 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 35 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 Комарова В.Ф. «Удосконалення методу видалення неметалічних включень впливом на процеси переносу в розплаві у порожнині проміжного ковша» вважаю, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Комаров Василь Федорович заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент,
Старший 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:

Вчений секретар

Інституту електрозварювання
ім. Є. О. Патона НАН України



І.М. Клочков