

ВІДГУК

**офіційного опонента, кандидата технічних наук, доцента Герасименко В. Г.
на дисертаційну роботу Комарова Василя Федоровича**

"Удосконалення методу видалення неметалічних включень впливом на процеси переносу в розплаві у порожнині проміжного ковша", яка подана до спеціалізованої вченої ради Д 08.084.03 при Національній металургійній академії України на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів (136 – металургія).

Актуальність теми дисертації. Дисертаційна робота присвячена математичному моделюванню гідро газодинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів, що мають місце в процесі видалення неметалічних включень в технології рафінування рідкого металу в проміжному ковші машин безперервного розливання заготовок. До числа основних завдань сучасної металургії відноситься розробка і впровадження нових технологій, спрямованих на досягнення високої чистоти від неметалічних включень в листовому прокаті, що отримується з безперервнолитих слябів, при мінімальних енерго- і ресурсовитратах. З розвитком безперервного розливання виникли умови, де поєднання розливання і позаагрегатних способів рафінування металу є незаперечним. Ключовим відповідальним агрегатом машин безперервного розливання заготовок, в якому ще можливе проведення таких операцій по зниженню забрудненості металу неметалічними включеннями, служить проміжний ківш. Одним із відомих способів рафінування сталі від неметалічних включень є секціонування проміжних ковшів розділовими перегородками, інколи також для цього завіюється продувка металу інертним газом через фурми.

Незважаючи на численні дослідження, присвячені аналізу процесів видалення неметалічних включень, до теперішнього часу остаточно не існує однозначно встановлених універсальних умов оптимального рафінування сталі від неметалічних включень в проміжному ковші МБРЗ. Внаслідок цього вибір конструктивних параметрів проміжних ковшів і умов продувки інертним газом носить переважно емпіричний характер. Кількісні оцінки зміни розподілу неметалічних включень в ході рафінування сталі вельми нечисленні, залишається багато питань, які потребують удосконалення. Для забезпечення нового рівня виробництва важливо розвивати методи математичного моделювання процесів, що мають місце, зокрема методу очищення розплаву від неметалічних включень в проміжному ковші.

У зв'язку з цим дослідження гідродинаміки течій розплаву в проміжному ковші та його взаємодії зі шлаком, а також, у разі наявності продувки, з аргонном, вибір раціональних конструктивних параметрів промковша, його облаштування вбудованими елементами, вибір конструктивних параметрів каналних протяжних фурм, відпрацювання режимів продувки аргонном і кількісна оцінка впливу зазначених процесів на результати рафінування сталі від неметалічних включень при безперервній розливці є актуальною науковою задачею.

З погляду на викладене тема дисертаційної роботи безумовно є актуальною, становить значний науковий та практичний інтерес. Актуальність теми також підтверджується тим, що подана робота відповідає тематиці науково-дослідних робіт, які виконувалися в Донецькому національному університеті імені В. Стуса, і 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

Ступінь обґрунтованості, повнота викладення та наукова новизна отриманих результатів. Обґрунтованість та достовірність отриманих автором результатів досліджень і висновків дисертації базується на використанні в роботі фундаментальних положень теорії теплообміну, теплопровідності, гідродинаміки, термодинаміки, фізики нерівноважних процесів та технології ливарного виробництва. Використовувалися 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 експлуатації. Обчислювальні експерименти з дослідження теплофізичних і гідродинамічних процесів проводилися на персональних комп'ютерах. Експериментальні дослідження, що виконані в умовах ФТІМС НАНУ та ПАТ МК "Азовсталь", проведені з використанням методу планування експерименту і сертифікованих засобів контролю якості продукції. Лабораторні дослідження проведені з використанням засобів експериментальної механіки, дослідження характерних неметалічних включень в досліджуваному металі виконані на автоемісійному сканувальному електронному мікроскопі ULTRA 55 з кількісною оцінкою їх хімічного складу на спектрометрі енергетичної дисперсії INKAPentaFETx3, при обробці результатів застосовані методи математичної статистики та спектрального аналізу.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертації, спираються на великий матеріал фізико-математичного моделювання та його аналіз, мають достатньо високий ступінь наукової обґрунтованості і не викликають сумнівів. Автор дисертації правильно сформував мету і завдання своєї роботи, і судячи зі змісту дисертації та автореферату, повністю їх виконав.

Наукова новизна отриманих дисертантом результатів і висновків полягає у наступному:

1. Отримав подальший розвиток метод моделювання процесів переносу в проміжному ковші на основі теорії суцільних середовищ шляхом врахування бульбашкового режиму продувки через інжекцію газової фази безпосередньо в об'єм розплаву в колі продувного блоку та використання еквівалентних ефективних перетинів для граничних умов на ділянках надходження та витоку сталі. Це дозволило виконати моделювання в усьому діапазоні досліджуваних режимів продувки при непорушенні умов наближення суцільного середовища, дотриманні необхідних витрат аргону та актуальної витрати металу через промковщ, і в результаті отримати нову інформацію про механічні аспекти теорії очищення металу від неметалічних включень з модельної задачі з ідеалізованою репрезентацією геометрії металургійного пристрою.

2. Отримана нова інформація з теорії струменевих течій, що розвиваються в обмеженому просторі 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 при поверхневому шарі.

3. 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" та всього шлакового покриву і низькій ймовірності затягування шлаку в об'єм розплаву.

4. Отримали подальший розвиток підходи до дослідження фізичних процесів у замкнених об'ємах металургійних агрегатів, зокрема у проміжному ковші МБРЗ, завдяки запропонованому в роботі 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 виокремлення 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.

Практичне значення результатів, одержаних здобувачем.

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).

Виявлено закономірності впливу режимів продувки і параметрів багатоканальної поперечної донної фурми на формування газогідродинамічних потоків в проміжному ковші та вплив геометричних параметрів вбудованих елементів на структуру потоків металу в проміжному ковші МБРЗ в процесі обробки продувкою аргоном та без неї.

Виявлено 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 надають позитивний ефект рафінуванню рідкого металу і гомогенності параметрів розплаву перед надходженням до кристалізаторів.

Застосування розробленої технології рафінування металу в проміжному ковші МБРЗ у вигляді визначеного у 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 виділенням включень розміром понад 30 мк.

Складові технології перевірені в умовах ПАТ МК "Азовсталь" (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70 на експериментальному варіанті проміжного ковша, що був обладнаний дослідною донною фурмою з просторово орієнтованими каналами, що забезпечувала необхідний бульбашковий режим продувки. За результатами досліджень забрудненості безперервнолитих слябів загальний індекс забрудненості на дослідному металі на 52% нижче, ніж на порівняльному; кількість включень розміром менше 10 мк в загальній масі включень становить на порівняльному металі – 43,9%, на дослідному металі – 68,9%; кількість включень розміром понад 30 мк в загальній масі включень становить на порівняльному металі – 29,0%, на дослідному металі – відсутні.

Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в друкованих працях.

Матеріали дисертаційної роботи складаються з вступу, 4-х розділів, висновків, списку використаних джерел з 131 найменування та додатків і викладені на 171 сторінці, містять в тому числі 47 рисунків та 16 таблиць.

Результати та основні висновки досить повно представлені в публікаціях автора, оприлюднені на міжнародних конференціях, відомі фахівцям, які працюють в області металургії сталі, кольорових металів та спеціальних сплавів. Їх викладено в 35 наукових працях, з них 1 монографія, 8 робіт в фахових виданнях (з яких 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 тощо та 19 тез доповідей на науково-практичних та науково-методичних конференціях.

Ідентичність змісту автореферату та основних положень дисертації.

Автореферат дисертації повністю відповідає змісту результатів та висновків дисертаційної роботи. Він характеризує ступінь новизни та практичної цінності досліджень, проведених здобувачем і показує особистий вклад дисертанта у вирішення задач, які були поставлені в роботі.

Відповідність дисертаційної роботи спеціальності.

Дисертаційна робота Комарова Василя Федоровича "Удосконалення методу видалення неметалічних включень впливом на процеси переносу в розплаві у порожнині проміжного ковша" за змістом, об'ємом та оформленням повністю відповідає спеціальності 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів (136 – металургія), за якою представлена до захисту.

Основний зміст роботи.

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертаційної роботи, необхідність розробки технології виробництва чистих сталей із застосуванням сучасного комплексу, що особливо важливо для випуску високо вуглецевих сталей високої якості. 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 "Стан проблеми і завдання дисертаційної роботи" наведено аналітичний огляд пов'язаних з темою роботи наявних досліджень та сучасного стану проблеми використання проміжного ковша, що є фінальною частиною виробничої лінії безперервного розливання, в якості агрегату безперервної дії, де можливе додаткове позапічне рафінування для видалення вторинних неметалічних включень та підвищення якості сталі, що розливається. В розділі виконано огляд особливостей конструкції ПК, пов'язаних з ним технологічних процесів і заходів, що вживаються під час проектування та експлуатації металургійного агрегату. Виявлено існуючі проблеми технології додаткової обробки сталі на стадії проміжного розподільного пристрою. Також у розділі проведено порівняльний аналіз поширених на практиці та використаних у наявних роботах за темою роботи підходів до дослідження, що залучають моделі фізичних процесів в проміжному промковші. Визначені їх недоліки та напрямки вдосконалення методу дослідження залученням інформації, що отримується при розв'язанні системи рівнянь механіки суцільних середовищ.

У другому розділі "Модель гідродинамічних, теплофізичних і масообмінних процесів у проміжному ковші" 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, що для забезпечення дослідного бульбашкового режиму продувки ванни проміжного ковша при дотриманні умов повного виведення з розплаву сукупного об'єму газової фази, що досягає межі

"метал – шлак", через шар шлаку, діаметр бульбашок в момент досягнення шару шлаку повинен дорівнювати 10- 11 мм, що може бути забезпечено, якщо в момент відриву від отворів продувного блоку діаметр бульбашок становитиме 4.7-5.2 мм. Такі умови продувки аргоном потребують фурму з підвідними каналами $\varnothing$ 1.3-1.7 мм. Діаметр підвідного каналу 1.7 мм гарантує здолання бульбашками шару покривного шлаку, що є запорукою підтримування всієї площі межі контакту з металом в активному для асиміляції неметалічних включень стані.

У третьому розділі "Аналіз результатів моделювання гідродинамічних процесів в сталих і перехідних режимах промковша" розглядаються гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша в залежності від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів. Увага приділена пасивному формуванню структури течій та впливу конфігурації вбудованих елементів на вимушену конвекцію в порожнині промковша. Дослідження циркуляційних потоків металу проводилися методом математичного моделювання стосовно моделей 40- та 60 –тонного проміжних ковшів двоструменевої слябової МБРЗ конверторного цеху ПАТ МК "Азовсталь", конструкція яких описана в другому розділі роботи. Чисельне моделювання гідродинаміки потоків металу проводили стосовно розливання сталі в кристалізатори перерізом 1850x250 мм і витягування слябів зі швидкістю 0,7-0,8 м /хв.

Аналіз результатів моделювання підтвердив ефективність застосування обмежуючої турбулентності вставки "турбостоп" та виявив недоліки типової конструкції, яка також призводить до триразового падіння інтенсивності загальних процесів перемішування в порожнині промковша одночасно зі зниженням турбулізації розплаву до 50% від початкової енергії.

Також у розділі за результатами моделювання 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 "Аналіз впливу процесу продувки ванни промковша на кінетику видалення неметалічних включень" розглядаються гідродинамічні аспекти формування струменевих течій в порожнині проміжного ковша в залежності від його внутрішньої конфігурації і вбудованих елементів під дією бульбашкового режиму продувки. Увага приділена аналізу структури течій при наявності продувки аргоном та впливу на характер вимушеної конвекції в порожнині промковша поєднання продувки з облаштуванням промковша вбудованими елементами.

У розділі наведені результати дослідження щодо 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". Для виконання умови транспортування всього об'єму металу, що надходить в проміжний ківш, в зону розділу "метал – шлак" у якості приєднаної маси необхідно подати витрату газу у вигляді сукупності окремих бульбашок в

перерахунку на умови холодного аргону відповідає 6–7 м³/год. Близьке значення витрати газу отримано з умови мінімізації збурень на межі розділу "метал - шлак", що порушують рівновагу у стратифікації шарів металу і шлаку.

Розглянуті механізми видалення неметалічних включень перевірені в умовах ПАТ МК "Азовсталь" (м. Маріуполь) при безперервному литті слябів зі сталі категорій міцності Х60 і Х70. Експериментальний варіант проміжного ковша було обладнано дослідною донною фурмою з просторово орієнтованими каналами, що забезпечує бульбашковий режим продувки.

Недоліки відносно змісту та результатів роботи.

До недоліків відносно змісту та результатів роботи слід віднести наступне:

1. У розділі 1 (стор. 24–38) дисертації достатньо повно висвітлено зарубіжний та вітчизняний досвід досліджень з використання проміжного ковша для рафінування металу від неметалічних включень і пов'язаних з цим технологічних процесів і заходів, що вживаються під час проектування та експлуатації цього металургійного агрегату, а також виконано аналітичний огляд та систематизацію відомих на даний час підходів до моделювання та вивчення зазначених процесів. Однак, мало уваги приділено аналізу джерел походження та складу неметалічних включень.

2. З інформації на стор. 42 (розділ 2) слід, що для формулювання математичної моделі, яка використовується для досліджень в роботі, застосовано припущення про те, що промковш попередньо наповнено розплавом. Але саме нестационарні процеси при наповненні промковша є причиною утворення значної кількості неметалічних включень у розплаві.

3. В роботі не розглянуто початок розливання, коли металоприймач приймає перший удар струменю сталі, адже початок розливання має свої особливості.

4. На стор. 74 зауважено, що моделювання виконується для двох варіантів (43-тонного та 63-тонного проміжних ковшів двострумкової слябової МБРЗ конверторного цеху ПАТ МК "Азовсталь", конструкція яких описана в другому розділі), але в постановці модельної задачі (розділ 2.1) присутнє креслення лише одного варіанту промковшу. На мій погляд в роботі треба було б провести експерименти також на сортових та блюмових МБРЗ при розливанні різних марок сталі.

5. В роботі мають бути докладніше розглянуті методи визначення якісних та службових показників, а також структуроутворення сталевої металопродукції.

6. Великі таблиці з інформацією, що отримана з розрахунків під час моделювання для різних конфігурацій та умов продувки на стор. 128–131 (розділ 4.3), для кращого подання матеріалу логічним було винести у окремий додаток, бо наступна таблиця 4.5 узагальнює отриману в чотирьох серіях експериментів інформацію.

7. Разом з тим в розділі 4 відсутня детальна інформація про результати моделювання з низькою витратою аргону (від 2 м³/год на продувний блок), про яке йдеться мова на стор. 109.

8. На деяких графіках (наприклад, рис. 3.4, 3.5) одиниці вимірювання часу позначені як "сек", коректно писати "с".

Загальні висновки.

Зазначені зауваження не знижують наукової та практичної цінності дисертаційної роботи Комарова В.Ф. В цілому, вона за своїм рівнем, об'ємом та оформленням повністю відповідає вимогам до дисертаційних робіт на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: є закінченою науковою працею, яка виконана на актуальну тему, 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.

Дисертаційна робота Комарова Василя Федоровича "Удосконалення методу видалення неметалічних включень впливом на процеси переносу в розплаві у порожнині проміжного ковша" відповідає вимогам Постанови кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 "Порядок присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника" до кандидатських дисертацій, її автор заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів (136 – металургія).

Офіційний опонент: старший науковий
співробітник відділу Фізико-технічних
проблем металургії сталі Інституту чорної
металургії ім. З.І. Некрасова Національної
Академії наук України,
кандидат технічних наук, доцент

В.Г.Герасименко

Підпис Герасименка Віктора Григоровича
засвідчую:

Вчений секретар ІЧМ НАН України
канд. техн. наук



А.А. Кононенко