

**ВІДГУК**  
**офіційного опонента**  
**на дисертаційну роботу Костецького Юрія Віталійовича**  
**«НАУКОВІ І ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ**  
**І КОНТРОЛЮ ПРОЦЕСІВ РАФІНУВАННЯ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ**  
**РОЗПЛАВІВ ВІД МІДІ ТА СІРКИ»**  
**подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук**  
**за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів**  
**та спеціальних сплавів»**

**1. Актуальність теми дисертації**

Визначною тенденцією розвитку чорної металургії в сучасних умовах постійного зниження якості сировини та посилення вимог до захисту навколишнього середовища є все більш повне задоволення вимог споживачів до якості та стабільності властивостей металопродукції.

Переплав брухту дозволяє скоротити питому витрату первинних ресурсів та енергії на виробництво сталі і техногенне навантаження на навколишнє середовище. У зв'язку з цим у світі спостерігається поступове зростання об'ємів виробництва електросталі та збільшення її частки у структурі світового виробництва. Зараз вона складає близько третини. У Європі, як відповідь на глобальні екологічні виклики, цей показник поступово наближується до 50%.

На цьому фоні структура металургійного комплексу України, яка представлена переважно крупними вертикально-інтегрованими компаніями, які базуються на схемі “доменний процес-конвертерний процес”, потребує збільшення частки і розвитку виробництва електросталі.

Суттєвою проблемою підчас виплавки сталі з використанням металевого брухту є його забрудненість домішками кольорових металів, перш за все – міддю. Підвищений вміст міді може стати причиною утворення тріщин у заготівлі під час безперервного розливання і гарячої деформації та погіршення механічних властивостей для більшості марок сталі. Мідь потрапляє до ста-

леплавильного агрегату з металошихтою і не може бути видалена з рідкого металу шляхом окислювального рафінування. Це ускладнює підбір шихтових матеріалів для виробництва якісних сталей та збільшує виробничі витрати. Відповідно актуальним завданням є створення технології, яка б забезпечувала рафінування залізовуглецевих розплавів від розчиненої міді в процесі виплавки сталі.

Наряду з хімічним складом сталі на її якість впливає наявність неметалевих включень (НВ), кількість, морфологія та розміри яких залежать від технології розкислення сталі та подальшої технології її позапічної обробки та розливання.

Ідея видалення міді з залізовуглецевих розчинів шляхом її вилучення до сульфідної фази запатентована ще в 1950 році Дж. Джорданом у США. У подальшому виконано низку робіт, які спрямовані на дослідження закономірностей сульфідного рафінування.

Відома значна кількість лабораторних експериментальних даних, які дозволяють принципово оцінити можливості методу сульфідного рафінування. Однак, практичні аспекти і ефективність його реалізації в умовах виробництва потребують додаткових досліджень. Зокрема, потрібна розробка і випробування технологічних заходів, які забезпечують проведення процесу рафінування і подальшого доведення металу на сучасному обладнанні.

Важливою є проблема раціональної організації десульфурації металу після сульфідного рафінування. Значний вміст сірки в металі після такої обробки може перевищувати 0,5%, що робить традиційну практику рафінування сталі з вилученням сірки до шлаку надто затратною через потребу у витраті значної кількості матеріалів та енергоресурсів. Відповідно розробка методів рафінування металу після сульфідної обробки з прийнятною витратою ресурсів є актуальною науково-технічною проблемою.

Актуальність тематики відповідає положенням «Державної програми розвитку та реформування гірничо-металургійного комплексу України до 2020 року», «Програмі науково-технічного розвитку Донецької області на період до 2020 року».

Таким чином, науково-технічні проблеми, вирішені в роботі, відповідають пріоритетам розвитку досліджень у галузі теорії і технології сталеплавильного виробництва.

## **2. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації**

Обґрунтованість наукових положень дисертаційної роботи «Наукові і теоретичні основи інтенсифікації і контролю процесів рафінування залізовуглецевих розплавів від міді та сірки» забезпечено багатостороннім аналізом 220 літературних джерел.

Проаналізовані джерела охоплюють: передові технології інтенсифікації плавки в сучасних електropечax; проблему зниження вмісту домішок, неметалевих включень в металі ДСП і вплив їх на властивості сталі; дослідження характеру зміни вмісту домішкових елементів і НВ на всіх стадіях технології виробництва сталі (виливка, позапічна обробка, розливання на МБЛЗ).

Наукові підходи, трактування основних положень і висновків дисертації, а також достатня апробація у публікаціях дозволяють констатувати достатню ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, що сформульовані у дисертаційній роботі.

## **3. Достовірність отриманих у роботі результатів**

Всі дослідження виконані за стандартними методиками і узгоджуються з теоретичними твердженнями автора стосовно висунутих рішень по питаннях дисертаційної роботи.

Отримані результати не суперечать загальноприйнятим уявленням в галузі металургії та не суперечать експериментальним даним.

Отримані в роботі результати обговорені на наукових конференціях високого міжнародного рівня, а також на наукових семінарах.

## **4. Наукова новизна роботи**

У дисертаційній роботі виконано комплекс теоретичних розробок та експериментальних досліджень пірометалургійних процесів рафінування залізовуглецевих розплавів від розчиненої міді сульфідним методом і наступ-

ного видалення сірки та неметалевих включень з металу, а також розробки теоретичних основ моніторингу та контролю продування рідкого металу інертним газом на установці ківш-піч шляхом аналізу віброактивності поверхні стальківша. Отримані результати є теоретичним узагальненням та вирішенням важливої науково-технічної проблеми, що має народногосподарське значення.

Автором вперше дана оцінка сорбційної здатності сульфідної фази по відношенню до міді, яка залежить від вмісту сульфиду натрію і досягає найбільшого значення з його мольної частки близько 40%.

Вперше показано, що в умовах сульфідного рафінування металу разом з міддю зменшуються концентрації інших домішкових металів, причому ступінь їх видалення збільшується в ряду мідь, нікель, марганець і визначається їх спорідненістю до сірки та термодинамічною активністю в розплаві, що підтверджено експериментально.

Вперше експериментально встановлено і теоретично обґрунтовано, що введення алюмінію у насичений сіркою залізовуглецевий розплав, який містить розчинену мідь, призводить до одночасного зменшення концентрацій сірки і міді в металі внаслідок утворення сульфідної фази з сульфідом алюмінію. Останній зменшує величину коефіцієнту активності міді у сульфідній фазі і підвищує активність сірки в металі, що сприяє збільшенню коефіцієнту розподілу міді між металом і сульфідною фазою.

Вперше запропоновано та теоретично обґрунтовано механізм інтенсифікації процесу видалення зі сталі неметалевих, зокрема оксидних, включень розміром до 20 мкм, шляхом введення в об'єм розплаву твердих тугоплавких рафінувальних частинок оксиду алюмінію розміром 0,4-1,0 мм. Такі частинки забезпечують ефективність видалення включень нарівні з флотацією бульбашками газу розміром 5 мм.

Теоретично обґрунтована і експериментально показана можливість видалення сірки з розплаву із високим вмістом вуглецю шляхом утворення газоподібного оксиду.

## 5. Значення отриманих у дисертації наукових та практичних результатів

Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи полягає у наступному:

– розроблено наукові основи технології сульфідного рафінування залізо-вуглецевих розплавів в тигельній індукційній печі з використанням суміші реагентів на основі соди і сірки, яка забезпечила зниження концентрації розчиненої міді від початкового вмісту близько 1% до рівня, що не перевищує 0,3%. Розроблений технологічний процес рафінування випробувано у виробничих умовах;

– встановлено і експериментально підтверджено, що для ефективного процесу сульфідного рафінування необхідною є розвинена поверхня міжфазового контакту, яку доцільно створювати шляхом інтенсивного перемішування сульфідної і металеві фази з наступним їх максимально повним розділенням по завершенні рафінування;

– запропоновано новий метод інтенсифікації процесу рафінування рідкого металу в ківші від неметалевих включень шляхом введення в об'єм розплаву за допомогою зануреної фурми дрібних тугоплавких твердих частинок одночасно з продуванням розплаву інертним газом крізь донні пристрої;

– запропоновано, науково обґрунтовано і експериментально доведено доцільність нового підходу до організації процесу десульфурації насиченого сіркою залізовуглецевого розплаву шляхом вилучення сірки до газової фази в процесі продування рідкого металу киснем;

- експериментально підтверджено ефективність техніки моніторингу процесу продування металу інертним газом в ківші під час позапічної обробки на основі аналізу віброакустичних даних з поверхні сталерозливного ківша;

- наукові і практичні результати роботи використані у виробничому процесі на ПАТ «Костянтинівський завод «Втормет»» під час переробки брухту з підвищеним вмістом міді.

Основні положення дисертації використовуються у навчальному процесі під час виконання магістерських дипломних робіт студентами українських технічних вузів.

## **6. Загальна характеристика змісту дисертації та автореферату**

Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 220 найменувань та додатків. Дисертація має загальний обсяг 325 сторінок, 107 рисунків і 32 таблиці.

За структурою дисертація та автореферат є логічними, підпорядкованими меті роботи та її завданням. Оформлені грамотно і відповідно вимог ДАК Міністерства освіти і науки України, щодо докторських дисертацій. Автореферат достатньо повно відображує зміст дисертації. Тема і зміст дисертації відповідають паспорту спеціальності 05.16.02 -металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

В роботі використані стандартні методи хімічного аналізу складу металу та шлаку, які виконані в сертифікованій лабораторії аналітичного контролю. Термодинамічний аналіз застосовано для оцінки здатності елементів-десульфураторів та поведінки НВ при різних умовах їх виникнення.

Розподіл потоків рідкої сталі та траєкторії руху неметалевих частинок при інжекції у метал вивчали шляхом комп'ютерного моделювання.

Металографічний та рентгеноспектральний аналіз зразків сталі проводили на растровому електронному мікроскопі. Контроль енергетичних параметрів та температурних режимів плавки виконаний з використанням повірених приборів. Експериментальні дані обробляли методами математичної статистики для встановлення залежностей між технологічними параметрами і властивостями одержаної сталі.

Високий рівень ілюстрацій значно спрощує розуміння тексту дисертаційної роботи.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження і відповідність роботи основним цілям і завданням розвитку металургійного комплексу України, сформульовано мету і задачі дослідження, показано наукову новиз-

ну та практичне значення отриманих результатів, а також наведені відомості щодо апробації та публікації основних результатів роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз існуючої технології виробництва сталі з точки зору забезпечення допустимого вмісту міді в готовому металі. Визначені джерела потрапляння міді в завалку, серед яких основним є сталевий брухт. Мідь надходить до сталеплавильного агрегату з металошихтою і не може бути видалена з розплавленого металу в процесі окислювального рафінування, що обумовлене фізико-хімічними особливостями поведінки міді в системі “рідкий метал-оксидний шлак”. Відтак, проблема рафінування залізовуглецевих розплавів від міді не може бути ефективно вирішена в циклі сучасного сталеплавильного виробництва. Зокрема вона є вкрай актуальною для електросталеплавильного виробництва, де сталевий брухт складає основу металошихти. Прогнози показують, що об’єми виробництва електросталі та її частка у загальносвітовому виробництві сталі в майбутньому будуть збільшуватись. Відповідно, буде зростати і споживання брухту, а проблема з домішками міді загострюватись. Виходячи з цього проблема створення технології виробництва сталі з можливістю рафінування рідкого металу від розчиненої міді є актуальною.

Аналіз даних, виконаний автором показав, що низька швидкість процесу випаровування утруднює організацію ефективного рафінування металу від розчиненої міді в технологічному циклі виробництва сталі через необхідність тривалої витримки рідкого металу під вакуумом. Тому метод рафінування розплаву сульфідними флюсами визначено як перспективний для побудови промислової технології.

До цього часу накопичено значну кількість лабораторних експериментальних даних, які дозволяють принципово оцінити можливості методу сульфідного рафінування та визначити сприятливі умови для його проведення. Аналіз публікацій показав, що, як основа для сульфідного флюсу, найбільшу цікавість у дослідників обґрунтовано викликали системи  $\text{FeS-NaS}_{0,5}$  та  $\text{FeS-AlS}_{1,5}$ . Однак, практичні аспекти реалізації процесу сульфідного рафіну-

вання і подальшого доведення металу в умовах виробництва не розглянуто в літературі і потребують досліджень.

У **другому розділі** подано результати термодинамічного аналізу умов переходу міді з рідкого металу до сульфідної фази, представлено та проаналізовано результати експериментальних досліджень з сульфідного рафінування.

Можливість видалення розчиненої міді з залізовуглецевих розчинів шляхом її переведення до сульфідної фази обумовлена тим, що при температурах сталеплавильних процесів хімічна спорідненість міді до сірки є більшою ніж у заліза. В той же час, термодинамічний аналіз показує, що безпосереднє утворення чистих сульфідів міді в об'ємі рідкого металу неможливе. Однак мідь, яка розчинена в залізі, може переходити з рідкого металу до сульфідної фази, утвореної на основі сульфиду заліза. Тобто з розчиненням сульфиду міді у сульфіді заліза. Причому найбільш сприятливі термодинамічні умови для сульфідного рафінування складаються під час обробки насичених вуглецем розплавів заліза. Додавання до сульфідної фази сульфиду натрію збільшує значення коефіцієнту розподілу міді між нею і металом  $L_{Cu}$ , а також зменшує рівноважну концентрацію сірки в металі.

У експериментальних дослідженнях для формування сульфідної фази, що містить сульфід натрію, використовували карбонат натрію  $Na_2CO_3$ . В процесі термічного розкладання карбонату натрію (кальцинованої соди) в контакт з рідким залізом за наявності сірки відбувається утворення сульфиду натрію.

З метою дослідження особливостей техніки рафінування з застосуванням соди було проведено експериментальні дослідження з роздільним та комбінованим введенням сірки та соди у рідкий чавун, який містив розчинену мідь.

Аналіз результатів лабораторних експериментів з введенням соди у насичений сіркою рідкий чавун показали, що за певної витрати соди має місце рафінування металу від розчиненої міді. Найбільше скорочення концентрації



міді після обробки сягало 30% від початкового значення за загальної витрати реагентів 8,6% від маси металу.

Досліджено, яким чином в процесі сульфідної обробки змінюються концентрації інших елементів, що присутні в металі. Зокрема вуглецю, мангану, нікелю і фосфору. Манган, який має високу спорідненість до сірки, демонструє подібний до міді характер залежності величини залишкової концентрації від витрати соди. Залишкова концентрація вуглецю і сірки в металі зменшується зі зростанням витрати соди.

Таким чином, показано, що протягом сульфідної обробки відбувається зміна концентрації всіх елементів, які мають спорідненість до сірки більшу ніж у заліза. Це треба враховувати у разі рафінування багатоконпонентних розплавів.

Сульфідну обробку з використанням суміші реагентів було випробувано в дослідно-промислових умовах на тигельній 200 кг індукційній печі ЕСПЦ Костянтинівського заводу ВТОРМЕТ. Здійснювали обробку залізовуглецевого розплаву, попередньо легованого міддю. Для сульфідної обробки використовували суміш з порошків сірки, соди і вуглецю, що були взяті у співвідношенні 12/8,6/1.

Дослідження показали, що протягом інжекції реагентів концентрація сірки в металі поступово підвищується з 0,26% до 0,75% з одночасним зменшенням концентрації розчиненої міді. Дослідження зразків металу на електронному мікроскопі показало, що протягом продування спостерігається утворення в об'ємі металу значної кількості сульфідних неметалевих включень розмірами від 1 до 10 мкм. Причому протягом продування середній розмір включень збільшується з 1,0-1,5 мкм до 2-4 мкм завдяки процесу коагуляції. Дослідження хімічного складу сульфідних включень у характеристичному випромінюванні відповідних елементів показує, що вони містять мідь. Це дозволяє зробити висновок, що для досягнення найбільшого ефекту від сульфідного рафінування потрібними є заходи для покращення видалення

чисельних сульфідних включень, які в значній кількості присутні в об'ємі рідкого металу по закінченню обробки.

У розділі також представлені результати експериментальних досліджень впливу на залишковий вміст міді в металі присадок металевого алюмінію у насичений сіркою метал після закінчення інжекції сірковмісної суміші і вилучення з поверхні розплаву сульфідного флюсу. Встановлено, що після введення алюмінію на дзеркалі металу знову утворюється шар сульфідної фази, а концентрація сірки і міді в металі зменшується. Збільшення витрати алюмінію більше 0,01 кг/кг сприяло подальшій десульфурзації металу, але не впливало на вміст міді. Дослідження на електронному мікроскопі показали, що після присадки металевого алюмінію в метал неметалеві включення (НВ) набувають глобулярної форми і добре коагулюють, що безумовно повинно сприяти їх кращому видаленню з об'єму металу.

Представлені результати показують, що розроблений метод сульфідної обробки дозволяє вирішувати завдання з рафінування залізовуглецевих розплавів від розчиненої міді. До його переваг слід віднести відносну простоту реалізації і малу тривалість процесу обробки. У той же час в промислових умовах необхідно вирішувати завдання з ізолювання зони реакції від взаємодії з атмосферою, як з екологічних міркувань, так і для мінімізації окисного впливу атмосферного повітря.

У **третьому розділі** представлено результати досліджень, які спрямовані на вирішення завдання з розділення рідкого металу і сульфідної фази після сульфідного рафінування.

Ця задача має дві складові – видалення відпрацьованого сульфідного флюсу з дзеркала металу і рафінування об'єму металу від сульфідних неметалевих включень, які містять розчинену мідь.

Замість неефективного (через хорошу адгезію сульфідної фази до металу) механічного згрібання флюсу з поверхні металу, запропонована технологія з додаванням на поверхню рідкого флюсу охолоджуючого твердого матеріалу з наступним їх сумісним видаленням. Як охолоджуючий матеріал в ек-

спериментах випробували шамот та вапно фракцією 3-15 мм. Отримані результати показали, що така технологія забезпечує практично повне видалення сульфідної фази з дзеркала металу без втрат рідкого металу і запобігає поверненню міді з сульфідної фази внаслідок її взаємодії з окисною атмосферою.

Проблему інтенсифікації процесу рафінування металу від неметалевих включень досліджували з використанням комп'ютерного моделювання. Досліджено закономірності флотації неметалевих включень бульбашками газу і їх коагуляції з твердими рафінувальними частинками, штучно введеними в об'єм рідкого металу з метою інтенсифікації процесу видалення включень.

На основі результатів математичного моделювання процесу флотації неметалевих включень бульбашками газу показано, що найкращі результати можна досягнути за умови утворення великої кількості дрібних (1-5 мм) бульбашок газу, якомога рівномірно розподілених у об'ємі металу, що реалізувати на практиці вкрай складно. За результатами розрахунків, через механізм флотації бульбашками інертного газу можливо добре видаляти включення розмірами понад 50  $\mu\text{m}$ . Більш дрібні включення розмірами 10-50  $\mu\text{m}$  майже не видаляються таким шляхом.

Комп'ютерне моделювання показало, що розподілом твердих частинок в об'ємі рідкого металу можливо управляти шляхом застосування комбінованого продування металу крізь занурені фурми та продувальні блоки, розміщені у днищі ківшу. Характер руху частинок, які занурені в розплав, безпосередньо пов'язаний з умовами руху потоків рідкого металу, які виникають під впливом газового перемішування.

Показано, що рафінувальна спроможність частинок різко падає зі збільшенням їх діаметру. Для частинок діаметром 0,5 мм і 1 мм різниця не дуже значна, але при збільшенні розміру частинок до 3 мм ефективність видалення включень падає у декілька разів. Тож для видалення неметалевих включень діаметр твердих рафінувальних частинок має бути менше 1 мм. При цьому ефективність видалення неметалевих включень буде відповідати ефективнос-

ті газової флотації бульбашками діаметром 5 мм, але має трохи інший характер. Краще за все будуть видалятися включення розміром більше за 20  $\mu\text{m}$ , а для включень розміром менше за 10  $\mu\text{m}$  ефективність рафінування різко падає. Чим менший розмір твердої частинки, тим вище ефективність видалення включень. Проте дуже дрібні частинки можуть спливати з об'єму металу дуже повільно і самі бути джерелом забруднення металу, тому застосування часток з розмірами менше 300-400  $\mu\text{m}$  недоцільно. Окрім того, зі зменшенням розміру частинок ускладнюється організація процесу їх введення в об'єм рідкого металу.

Комп'ютерне моделювання показало, що при одночасному продуванні розплавленого металу в ківші крізь донну і занурену фурми, за певних умов можна деформувати висхідні потоки рідкого металу в зонах барботажу і домогтися затягування інжекттованих частинок в об'єм розплаву, збільшивши тим самим час їх перебування в металі.

За результатами досліджень був зроблений висновок, що обробка твердими частинками може забезпечити інтенсифікацію процесу рафінування рідкого металу від неметалевих включень при її застосуванні як одночасно з бульбашковою флотацією, так і без неї.

**У четвертому розділі** представлені результати досліджень з розробки методів інтенсифікації процесу десульфурації металу після сульфідного рафінування.

Розглянуто два можливих варіанти видалення надлишкової сірки без залучення методу шлакового рафінування – введення в метал активних елементів для утворення відповідних сульфідів і вилучення сірки у газову фазу під час окисного рафінування металу.

Для аналізу особливостей процесу десульфурації металу за рахунок введення активних елементів, які утворюють сульфіди, провели термодинамічні розрахунки.

В процесі комп'ютерних розрахунків було розглянуто системи Fe-C-S-Mg, Fe-C-S-Ca, Fe-C-S-Mn, Fe-C-S-Al, Fe-C-S-Zr, Fe-C-S-Ba у стані рівноваги.

В процесі моделювання передбачали, що на початку метал містить 4% С і 0,5% S. Згідно з результатами розрахунків найбільш ефективним десульфуратором у розглянутих умовах виявився алюміній, для якого теоретично необхідна питома витрата для досягнення кінцевого вмісту сірки не більше за 0,05% склала 2,8 кг/т. Далі йдуть магній (3,5 кг/т), кальцій (5,7 кг/т), цирконій (7,5 кг/т), марганець (8,0 кг/т) та барій (20 кг/т). Експериментальна перевірка впливу алюмінію на вміст сірки принципово підтвердила результати розрахунків.

Також представлено результати експериментальної перевірки висунутої концепції проведення десульфурації насиченого сіркою високовуглецевого розплаву одночасно з його зневуглецюванням в процесі продування газоподібним киснем. Теоретичний аналіз показує, що перехід сірки з металу в газову фазу з утворенням оксиду сірки  $SO_2$  можливий під час окислювального рафінування розплаву за умови високого парціального тиску кисню. В ході лабораторних досліджень було встановлено можливість одночасного рафінування залізовуглецевого розплаву від вуглецю та сірки з вилученням останньої до газової фази під час окислювального продування рідкого металу киснем. В лабораторних експериментах 20 кг насиченого сіркою синтетичного чавуну продували киснем та атмосферним повітрям в тиглі індукційної печі. Встановлено, що використання повітря для продування не призводило до окиснення сірки. Одночасне окиснення вуглецю і сірки відбувалось лише за умови продування газоподібним киснем. Під час окислення насиченого сіркою високовуглецевого розплаву газоподібним киснем протягом 30 хвилин було досягнуте зменшення концентрації сірки в металі з 0,5% до 0,19 і 0,30% в різних експериментах з одночасним зменшенням концентрації вуглецю з 3% до 1,0 і 1,5%.

У розділі також представлені результати теоретичного аналізу впливу інтенсивності продування металу інертним газом на перебіг процесу десульфурації на агрегаті ківш-піч. Зокрема оцінено вплив зміни розміру продувальної плями на кінетику процесу десульфурації металу. На підставі результа-

тів аналізу показано, що незважаючи на зростання інтенсивності перемішування металу при перевищенні певної витрати інертного газу швидкість процесу десульфурзації може уповільнюватись через зменшення загальної площі контакту металу і шлаку.

**У п'ятому розділі** представлені результати досліджень з розвитку теоретичних та технологічних основ і алгоритмів моніторингу процесу продування сталі інертним газом під час позапічної обробки за результатами аналізу віброактивності поверхні сталерозливного ківша.

Представлено і проаналізовано результати лабораторних експериментів з дослідження впливу витрати продувального газу на спектр вібросигналу, з визначення інформативних діапазонів частот у спектрі вібросигналу, з визначення кореляції між енергією вібросигналу (середньоквадратичним значенням віброприскорення (СКЗ) та рівнем витрати газу у визначеному діапазоні частот спектру вібросигналу, з визначення впливу поверхневого натягу рідини на спектр та енергію вібросигналу.

Встановлено, що зменшення поверхневого натягу рідини на 33% призводить до зменшення рівня СКЗ в середньому на 20% за витрати газу 10 л/хв, а зі збільшенням витрати газу різниця зменшується і за витрати газу 40 л/хв складає близько 13%. Зміна величини СКЗ віброприскорення відображає зміну величини роботи на утворення бульбашки газу в рідині під час продування. Зі збільшенням витрати газу і переходом від бульбашкового режиму продування до струменевого, зменшується вплив властивостей рідини на процес утворення бульбашки, і її розмір визначається лише витратою газу.

У розділі представлено і проаналізовано результати досліджень, які було проведено в дослідно-промислових умовах на 150-тонній установці ківш-піч за розробленими і відпрацьованими в лабораторних умовах методиками. В діапазоні частот 15-95 Гц визначена хороша кореляція між інтенсивністю вібросигналу і величиною поточної витрати інертного газу крізь пористі вставки у днищі ківшу.

Обробка результатів вимірювань вібросигналу під час продування сталі

на УКП, отриманих на серії плавок дозволила визначити функціональний зв'язок між витратою аргону і СКЗ сигналу.

На промисловому агрегаті також спостерігається певна кореляція між інтенсивністю продування рідкого металу крізь донні продувні пристрої і СКЗ віброприскорення. Зі збільшенням витрати газу рівень СКЗ також збільшується. Тобто досліджуваний метод дозволяє в промислових умовах відстежувати перебіг процесу продування і отримувати непрямі дані щодо фактичної поточної витрати газу.

Обробка отриманих даних також показала, що на рівень СКЗ вібросигналу на частотах кратних 50 Гц впливає робота електричних дуг. Відповідно треба враховувати і вилучати з розгляду ці частоти в інформативному діапазоні для підвищення якості отриманих результатів.

На основі результатів проведених досліджень розроблений і успішно випробуваний у виробничих умовах в ККЦ ПАТ “Єнакіївський металургійний завод” експериментальний зразок апаратно-програмного комплексу віброакустичного моніторингу та управління процесом продування металу інертним газом на установці ківш-піч, який може надавати додаткову інформацію для прийняття вірного технологічного рішення і забезпечувати автоматичне керування витратою інертного газу.

## **7. Повнота викладу результатів в опублікованих працях**

Основні результати роботи відображені у 55 публікаціях, серед них:

- 2 - в виданнях, що включені до міжнародних науково-метричних баз;
- 24 - в наукових фахових виданнях;
- 4 - патенти;
- 25 - в матеріалах наукових конференцій.

Кількість та якість публікацій відповідає вимогам, що висунуто до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук.

Основні результати досліджень та висновки по них були представлені на міжнародних конференціях високого рівня.

## 8. Основні зауваження до дисертації

8.1. У розділі 2 на стор.44 автор ствержує, що найбільш сприятливі умови для видалення міді з залізовуглецевих розплавів під час сульфідного рафінування складаються за насиченням металу вуглецем до (3-4%). Такі умови виконуються у кисневому конверторі при обробці чавуну. При виплаві сталі у дугової електропечі шихта складається з металобрухту та металізованої сировини з невеликим вмістом вуглецю, що потребує навуглецевання металу.

8.2. Автору слід було зробити техніко-економічне обґрунтування щодо впровадження у виробництво запропонованої технології. Технологічна схема виробництва сталі, яка наведена у розділі 4 на стор. 203, передбачає крім існуючих два додаткових агрегати. Так, сульфідне рафінування треба проводити у спеціальному ізольованому від навколишнього середовища реакторі. Рафінування від сірки та вуглецю потребує агрегату конверторного типу. Завершення процесу, як завжди, виконується у агрегаті ківш-піч. У випадку виробництва шихтової заготовки передбачено подвійний переплав металу. Усе це не може не збільшити собівартість готової металопродукції.

8.3. На стор. 200 (розділ 4) наведені результати досліджень видалення сірки у газову фазу із синтетичного чавуну за рахунок кисневої продувки. Однак, відомо, що у виробничих умовах при продуванні чавуну киснем у конверторі процес видалення сірки до газової фази з утворенням газоподібного оксиду не має суттєвого значення, а десульфурацію реалізують на установці ківш-піч за рахунок основного шлаку.

8.4. На стор. 217 (розділ. 4) автор пропонує використовувати щодо десульфурації розплаву метали які мають підвищену спорідненість до сірки і здатні утворювати в металі сульфіди. Запропоновані метали (магній, кальцій, барій, цирконій) достатньо дорогі та збільшують кількість неметалевих включень у розплаві. За таких умов, треба було розглянути ефективність використання шлакоутворюючих сумішей.



8.5. У загальних висновках дисертаційної роботи висновки 3 та 6 мають характер анотацій, а висновок 12 не стосується рафінування розплаву від міді та сірки.

8.6. У дисертації мають місце невеликі відхилення від правил оформлення тексту. На деяких рисунках застосований дуже малий шрифт і написи погано читаються. На рисунках 3.1, 3.2, 3.9, 3.10, 3.29-3.32 та ін. наведені пояснення російською мовою.

Зроблені зауваження не ставлять під сумнів достовірність матеріалів дисертації, її основних положень і висновків, не знижують теоретичну та практичну цінність роботи.

## **9. Висновок щодо відповідності дисертації встановленим вимогам**

9.1. Комплекс досліджень, що виконан у дисертаційній роботі, а також закономірності, отримані за результатами роботи, становлять теоретичну і практичну цінність щодо впливу сульфідного рафінування з використанням соди і сірки на зменшування вмісту розчиненої міді в залізо-вуглецевому розплаві в декілька разів.

9.2. Аналіз результатів досліджень, що наведені у дисертаційній роботі, дає змогу констатувати, що вирішені актуальні наукові та практичні завдання з розробки технології видалення міді та подальшої позапічної обробки металу.

9.3. У повному обсязі вирішені завдання дисертаційної роботи.

9.4. Результати, що отримані, розширюють існуючі уявлення про процеси видалення міді та позапічної обробки сталі для стабілізації умов безперервного розливання.

9.5. За актуальністю, науковою новизною, повнотою досліджень та практичною значимістю результатів дисертаційна робота за темою «Наукові і теоретичні основи інтенсифікації і контролю процесів рафінування залізовуглецевих розплавів від міді та сірки» є закінченою кваліфікаційною науковою працею, в якій отримані нові наукові результати, які базуються на теоретичному аналізі і результатах експериментальних досліджень. В роботі виріше-

вирішена важлива науково-прикладна проблема з розробки і обґрунтуванню методів інтенсифікації та контролю процесів рафінування залізобуглецевих розплавів від міді з застосуванням методу сульфідного рафінування, та наступного рафінування від сірки і неметалевих включень.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Рецензована дисертаційна робота відповідає вимогам п.п. 9, 11,12,13,14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 567, зі змінами, затвердженими постановами Кабінету Міністрів України від 19.08.2015 р. №656, та від 30.12.2015 р. №1159, а її автор - Костецький Юрій Віталійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Офіційний опонент,  
завідувач кафедри теорії металургійних  
процесів і ливарного виробництва ДВНЗ  
«Приазовський державний технічний університет»  
(м. Маріуполь),  
доктор технічних наук, професор

С.Л. Макуров

*Підпис Макурова С.Л.*

ЗАСВІДЧУЮ  
НАЧ. ЗАГАЛЬНОГО  
ВІДДІЛУ

*Змаєв* Т.О. ЗА

14.12.2014

