

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»

Актуальність теми дисертації та відповідність спеціальності 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

Розвиток промислового комплексу України безумовно пов'язаний з удосконаленням структури вітчизняного сталеплавильного виробництва, яке в поточний час представлено в основному киснево-конверторним процесом. Частина електросталеплавильного процесу зараз є невеликою і в перспективі повинна збільшуватись до середньо європейського рівня за рахунок введення нових потужностей, що в цілому відповідає загальносвітовій тенденції модернізації промислового виробництва в напрямку зменшення викидів парникових газів. На цьому фоні проблема забезпечення виробництва сталевим брухтом ще більш загостриться не тільки через збільшення попиту, але і через прогнозоване погіршення його якості. Зокрема через накопичення в ньому міді. Тому дослідження в напрямку створення основ технології, яка б забезпечувала рафінування рідкого металу від міді в процесі виробництва сталі є актуальними.

Дисертаційна робота Костецького Ю.В. спрямована на вирішення важливої науково-технічної задачі з дослідження і розробки наукових основ інтенсифікації та контролю процесів рафінування залізовуглецевих розплавів від міді з залученням методу сульфідного рафінування, наступної десульфурзації розплаву і його рафінування від неметалевих включень та процесу продування рідкого металу інертним газом на підставі аналізу віброактивності поверхні сталерозливного ківша.

Виходячи з вищевикладеного дисертаційна робота Костецького Ю.В. є актуальною для металургійних підприємств України та світу і у повній мірі відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Ступінь обґрунтованості, повнота і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій

Обґрунтованість і достовірність наукових положень дисертаційної роботи ґрунтується на використанні результатів аналізу достатньої кількості літературних джерел, патентів та експериментальних даних, а також даних власних теоретичних та експериментальних досліджень і розрахунків.

У роботі використані сучасні теоретичні та експериментальні методи досліджень. Під час експериментальних досліджень застосоване як стандартне обладнання, так і спеціально створені фізичні моделі та установки. Для опрацювання експериментальних даних, а також розрахунків процесів фло-

тації і коагуляції неметалевих включень використана програма Microsoft Excel. Для термодинамічних розрахунків використані загальноприйняті методи термодинамічного аналізу і, зокрема, пакет моделювання фізико-хімічних процесів HSC Chemistry. Комп'ютерне моделювання руху потоків рідкого металу і неметалевих частинок під час продування металу інертним газом здійснено з використанням програмного модуля ANSYS Fluent. Обробку результатів вимірювання віброакустичних сигналів проводили в програмах MatLab і Spectrolab. Для металографічних досліджень застосовували оптичну і електронну мікроскопію за стандартними процедурами. Для хімічного аналізу зразків металу і шлаку були задіяні загальноприйняті стандартні методики.

Наукові підходи, трактування основних положень і висновків дисертаційного дослідження, ступінь апробації та рівень публікацій основних результатів роботи дозволяють зробити висновок про достатній ступінь обґрунтованості наукових положень, запропонованих висновків і рекомендацій.

Загальна характеристика змісту дисертації

Дисертація складається з титульного аркуша, анотації, змісту, вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (220 найменувань) і додатків. Дисертація має загальний обсяг 325 сторінок. За структурою дисертація та автореферат є логічними, підпорядкованими меті роботи та її завданням.

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

Автором проведено критичний аналіз відомих методів рафінування залізобуглецевих розплавів від міді. Метод рафінування розплаву сульфідними флюсами визначено як перспективний для дослідження і побудови промислової технології.

Проведений автором аналіз публікацій показав, що, як основа для сульфідного флюсу, найбільш цікавими є системи FeS–NaS_{0,5} та FeS–AlS_{1,5}. Розглянуті відомі дані стосовно поведінки міді в системі залізобуглецевий розплав-сульфідна фаза і визначені сприятливі фізико-хімічні умови проведення сульфідного рафінування, а також запропоновані варіанти організації сульфідного рафінування. Відзначено, що практичні аспекти реалізації процесу сульфідного рафінування і подальшого доведення металу в умовах виробництва практично не розглянуто в літературі.

У **другому розділі** дисертаційної роботи представлені результати термодинамічного аналізу умов переходу міді з рідкого металу до сульфідної фази, а також наведені та проаналізовані результати власних експеримента-

льних досліджень з сульфідного рафінування залізовуглецевих розплавів в лабораторних та дослідно-промислових умовах.

Представлені результати лабораторних експериментів з використанням для формування сульфідної фази сірки та карбонату натрію. Досліджено сумісне та роздільне введення реагентів в рідкий метал. Визначено вплив сульфідної обробки на віддалення міді та зміну хімічного складу металу.

В розділі також описана методика проведення досліджень, представлені і проаналізовані результати експериментів з сульфідної обробки металу з метою видалення міді в дослідно-промислових умовах з інжекцією реагентів в розплав та перемішуванням реагуючих фаз шляхом переливання розплавів з однієї ємкості до іншої, а також результати дослідження впливу додавання металевого алюмінію до насиченого сіркою рідкого металу на вміст сірки та міді в ньому.

На підставі аналізу отриманих результатів зроблені рекомендації щодо умов успішної реалізації сульфідного рафінування в промислових умовах.

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

Автор відзначає, що це завдання має два аспекти – видалення відпрацьованого сульфідного флюсу з дзеркала металу і рафінування об'єму металу від сульфідної фази, яка присутня в об'ємі металу у вигляді сульфідних неметалевих включень. Описані та обґрунтовані випробувані під час експериментів методики і рекомендації з видалення шару сульфідного флюсу з поверхні металу.

Основний об'єм глави присвячений дослідженню проблеми інтенсифікації процесу рафінування металу від неметалевих включень з використанням комп'ютерного моделювання. Досліджено закономірності флоатації неметалевих включень бульбашками газу і їх коагуляції з твердими рафінувальними частинками, штучно введеними в об'єм рідкого металу з метою інтенсифікації процесу видалення включень.

Результати моделювання показали, що для інтенсифікації процесу видалення НВ з рідкого металу можна застосувати механізм коагуляції включень з твердими тугоплавкими частинками, штучно введеними в об'єм розплаву, що, згідно отриманих даних, може забезпечити ефективне рафінування рідкого металу від включень розмірами менше за 50 μm . Автором надані рекомендації щодо вибору матеріалу і розміру частинок.

Комп'ютерне моделювання також показало, що розподілом твердих частинок в об'ємі рідкого металу можна 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. Представлені результати дослідження впливу щільності матеріалу частинок та їх розміру на їх розподіл в об'ємі рідкого металу та тривалість перебування частинок в металі.

За результатами досліджень був зроблений висновок, що обробка твердими частинками може забезпечити інтенсифікацію процесу рафінування рі-

дкого металу від неметалевих включень при її застосуванні як одночасно з бульбашковою флотацією, так і без неї.

Четвертий розділ присвячений опису результатів досліджень методів інтенсифікації процесу десульфурації металу після сульфідного рафінування. Розглянуто два можливих варіанти видалення надлишкової сірки – 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 шляхом введення металів, що утворюють сульфідні, були проведені термодинамічні розрахунки з використанням програмного пакету моделювання фізико-хімічних процесів HSC Chemistry. Згідно з результатами розрахунків найбільш ефективним десульфуратором серед розглянутих (Mg, Ca, Mn, Al, Zr, Ba) у розглянутих умовах виявився алюміній.

Також представлено результати експериментальної перевірки висунутої концепції проведення десульфурації насиченого сіркою високовуглецевого розплаву одночасно з його зневуглецюванням в процесі продування газоподібним киснем. Результати проведених експериментів показали, що під час окиснення насиченого сіркою високовуглецевого розплаву газоподібним киснем досягається 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%.

В главі 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 результатів аналізу показано, що незважаючи на зростання інтенсивності перемішування металу при перевищенні певної витрати інертного газу швидкість процесу десульфурації може уповільнюватись через зменшення загальної площі контакту металу і шлаку. Результати теоретичних розрахунків співставленні з виробничими даними під час обробки сталі на установці ківш-піч (УКП) у 150 т ківші.

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 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.

Представлено і проаналізовано результати досліджень, проведених 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. Показано, що досліджуваний метод дозволяє в промислових умовах відстежувати перебіг процесу продування і отримувати непрямі дані щодо фактичної поточної витрати газу.

Представлено результати досліджень впливу режимів горіння електричних дуг на характеристики вібросигналу, зареєстрованого на поверхні корпусу лабораторної дугової печі, яка моделювала роботу УПК. Визначено, що зміна рівню сигналу у частотних діапазонах кратних 100 Гц дозволяє відслідковувати періоди горіння і визначати сприятливі режими горіння електричних дуг

Описана побудова випробуваного у виробничих умовах в ККЦ ПАТ “Єнакіївський металургійний завод” експериментального зразку 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 на УПК в процесі позапічної обробки. Відзначено, що корисний ефект від використання подібної системи управління продуванням може бути отримано на будь-якому сортаменті.

Наукова новизна отриманих результатів

В результаті теоретичного аналізу та експериментальних досліджень отримані нові відомості щодо пірометалургійних процесів рафінування залізовуглецевих розплавів від розчиненої міді сульфідним методом і наступного видалення сірки та неметалевих включень з металу, а також теоретичних основ та закономірностей процесу контролю продування рідкого металу інертним газом на установці ківш-піч шляхом аналізу віброактивності поверхні стальківша. Отримані результати і рекомендації характеризуються новизною, виконані експерименти – оригінальністю підходу.

До найбільш суттєвих, з наукової точки зору, результатів дисертації Костецького Ю.В. можна віднести наступне:

1. 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 коефіцієнта розподілу міді між металом і сульфідною фазою. Проте, з іншого боку позитивний вплив додавання алюмінію на вилучення міді обмежено відповідним зменшенням коефіцієнту активності міді в металі, внаслідок чого за певної концентрації алюмінію в металі і відповідно його частки у сульфідній фазі припиняється перехід міді з металу до сульфідної фази.

2. 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. Показано, що на процес закріплення неметалевого включення на поверхні твердої частинки найбільше впливають сили адгезії між ними, а потоки рідкої сталі, які діють на включення, здатні відірвати його від твердої частинки лише за швидкості руху понад 2 м/с.

3. Вперше експериментально показано і теоретично обґрунтовано, що під час продування киснем насиченого сіркою залізовуглецевого розплаву з високим вмістом вуглецю, можливим є одночасне протікання процесів зневуглицювання і видалення сірки з металу у газову фазу шляхом утворення газоподібного оксиду. При цьому можливе зменшення вихідної концентрації сірки (0,5%) в металі більше ніж в два рази з одночасним зменшенням вмісту вуглецю (3,0%) в металі в три рази за середнього відношення швидкості окиснення сірки до швидкості окиснення вуглецю близько 0,14%/хв.

4. Експериментально доведено і теоретично обґрунтовано можливість використання віброакустичних сигналів з поверхні ківша для моніторингу процесу продування сталі інертним газом під час позапічної обробки. Показано, що хороша кореляція між параметрами вібросигналу і величиною поточної витрати газу на продування спостерігається в частотному діапазоні 15-95 Гц, а потужність вібросигналу корелює з величиною витрати енергії на утворення бульбашок газу. Вперше визначено функціональну залежність між середньоквадратичним значенням віброприскорення (сигналу зареєстрованого на поверхні стальківша) в інформативному діапазоні частот і витратою газу за різних умов продування. Для бульбашкового режиму витікання газу отримана функціональна залежність має ступневий вигляд. Встановлено, що в спектрі вібросигналу спостерігається присутність характерних частотних піків, які відповідають власній частоті колювання бульбашок газу. Для системи “вода-повітря” вони знаходяться в діапазоні частот 2-3 кГц.

5. Показано і обґрунтовано вплив величини поверхневого натягу рідини на характеристики вібросигналу, який утворюється під час продування газом крізь донний продувний пристрій. Показано, що зі зменшенням поверхневого натягу рідини, яку продувають газом, інтенсивність вібросигналу зменшується через зменшення затрати енергії на утворення бульбашок газу за незмінного характеру залежності інтенсивності сигналу вібрації від витрати газу.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані результати є вирішенням важливої науково-технічної проблеми, яка має народногосподарське значення.

За результатами проведених досліджень розроблено основи технології сульфідного рафінування залізовуглецевих 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 в умовах ЕСПЦ ПАТ “Костянтинівський завод “Втормет”.

В ході досліджень було встановлено і експериментально підтверджено, що для ефективного процесу сульфідного рафінування необхідною є розви-

нена поверхня міжфазового контакту, яку доцільно створювати шляхом інтенсивного перемішування сульфідної і металевої фази з наступним їх максимальним 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 залізобуглецевого розплаву шляхом вилучення сірки до газової фази в процесі продування рідкого металу киснем, що дозволяє раціонально побудувати процес десульфурації металу після сульфідної обробки.

Експериментально показана ефективність техніки моніторингу процесу продування металу інертним газом в ківші під час позапічної обробки на основі аналізу віброакустичних даних з поверхні сталерозливного ківша. Розроблений і випробуваний пілотний зразок апаратно-програмного комплексу моніторингу і автоматичного управління продуванням металу інертним газом на установці ківш-піч успішно випробуваний в промислових умовах ККЦ Єнакіївського металургійного заводу.

Технологія віброакустичного моніторингу планується до використання на ПАТ «Енергомашспецсталь», м. Краматорськ.

Основні положення дисертації використовуються у навчальному процесі під час виконання магістерських і дипломних робіт студентами ДВНЗ “Донецький національний технічний університет” і НТУУ “Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського”.

Повнота викладення основних результатів дисертаційної роботи в наукових публікаціях

Основні результати дисертаційної роботи пройшли апробацію на 25 наукових конференціях, в тому числі закордонних (Чехія, Німеччина, Франція, Китай, Словачія). Матеріали дисертаційної роботи опубліковано в 25 роботах, в тому числі: 20 – статей у наукових фахових виданнях, затверджених ДАК України; 2 – статті у закордонних виданнях, що індексуються у науково-метричній базі Scopus, 3 – статті у періодичних наукових виданнях, а також 4 патенти.

Автореферат дисертації містить всю необхідну інформацію для оцінки дисертації, цілком ідентичний роботі, включає основні наукові положення, висновки і рекомендації, які приведені у дисертації.

Публікації в достатній мірі відображають основні положення дисертації. Кількість та якість публікацій відповідає вимогам, які пред'являють до дисертацій на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук.

Основні зауваження до дисертації

- 1) На сторінці 54 на рис. 1.10 недостатня точність вісі, що характеризує температуру, складно точно визначити відповідний діапазон температур, сприятливих для обробки розплаву.
- 2) У розділі 2.3 часто згадується сульфідна фаза, але у роботі немає даних щодо кількості фази, що утворилася на поверхні, та даних щодо її хімічного складу.
- 3) На сторінці 92 вказано, що потрібна «компенсація охолоджувального ефекту» від продування, але в тексті відсутні данні щодо зміни температури розплаву під час продування. Слід було б проаналізувати впливу різних умов введення реагентів на температурні показники процесу обробки.
- 4) У розділі 3.3 не розкрито питання впливу витрати газу, що створює бульбашки, на ефективність видалення неметалевих включень.
- 5) У розділі 3.4 відмічено, що на рух твердих часток може впливати температурний градієнт розплаву, проте не зрозуміло, чи врахований він під час комп'ютерного моделювання;
- 6) З розділів 4.3-4.4 не зрозуміло, яку величину складатиме втрата металу з оксидами та пилом під час окислювального продування без шлаку.
- 7) У розділах 4.3-4.4 не розглянуто важливе питання впливу формування шлаку, насиченого оксидами заліза, на поверхні ванни при кисневому продуванні на видалення сірки в газову фазу.
- 8) У розділі 5.4 у промислових умовах не досліджено вплив зміни параметрів ковша (його футерівки) та об'єму металу, що оброблюється, на сигнал вібрації.
- 9) У висновках не відмічений важливий факт впливу наявності вуглецю у розплаві на сульфідний процес видалення міді.
- 10) У розділі 4 слід було б оцінити раціональні параметри роботи агрегатів на кожному етапі маршруту.
- 11) Також було б доцільно для обґрунтування запропонованих технологічних рішень щодо інтенсифікації і контролю процесів рафінування залізовуглецевих розплавів від міді та сірки зробити розрахунки енергетичного та/або економічного балансів.
- 12) Деякі зауваження щодо використання термінології і до тексту роботи. Наприклад, на сторінці 134 у першому абзаці у тексті при згадуванні рис. 3.14 вказана «сила опору», а на рисунку «сила спротиву» та на сторінці 139 на рис. 3.17, 3.18 у назві рисунків вказано «напруження», а на рисунках вказана «напруга» - слід було використовувати єдину термінологію. На сторінці 171 на рис. 3.35 не зрозуміло, чим відрізняються умови продування на рисунках, що наведено зверху й знизу. На сторінках 80-82 слід було розмістити рисунки після їх першого згадування в тексті.

Наведені зауваження не впливають на загальну позитивну оцінку роботи, не знижують її теоретичної та практичної цінності, не зменшують значимість основних наукових положень та висновків, що винесені на захист.

Висновки щодо відповідності дисертації вимогам Міністерства освіти та науки України

Основні наукові положення, які приведені у дисертаційній роботі, висновки і рекомендації є обґрунтованими, оскільки базуються на теоретичному аналізі та результатах виконаних лабораторних експериментів та досліджень в промислових умовах.

Дисертаційна робота Костецького Юрія Віталійовича є завершеною науковою працею, в якій отримані нові науково обґрунтовані результати, що сприяють вирішенню актуальної задачі з розробки наукових основ інтенсифікації та контролю процесів рафінування залізобуглецевих розплавів від міді з залученням методу сульфідного рафінування, наступної десульфурзації розплаву і його рафінування від неметалевих включень та процесу продування рідкого металу інертним газом на підставі аналізу віброактивності поверхні сталерозливного ківша.

Вважаю, що рецензована дисертаційна робота за своєю вагомістю, новизною наукових результатів, їх практичним значенням, кількістю та обсягом публікацій відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо докторських дисертацій, а автор дисертаційної роботи – Костецький Юрій Віталійович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

Офіційний опонент
Завідувач відділом фізико-технічних
проблем металургії сталі
Інституту чорної металургії
ім. З.І. Некрасова НАН України
доктор технічних наук,
професор



А.Г. Чернятевич

Підпис д.т.н. Чернятевича А.Г. засвідчую
Вчений секретар
Інституту чорної металургії
ім. З.І. Некрасова НАН України




О.Є. Меркулов