

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу Костецького Юрія Віталійовича «Наукові і теоретичні основи інтенсифікації і контролю процесів рафінування залізвуглецевих розплавів від міді та сірки», представлену 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

Рациональне використання природних ресурсів пріоритетним напрямом вирішення проблем сучасної екологічної ситуації у світі. Збільшення частки виробництва сталі з використанням сталевих брухту дозволяє суттєво скоротити витрату первинних природних ресурсів, зокрема викопного палива, і зменшити техногенний вплив на навколишнє середовище. Зокрема, глобальний сценарій розвитку металургії до 2050 року, запропонований Міжнародним енергетичним агентством з метою запобігання зміни клімату, передбачає суттєве зростання об'ємів виплавки електросталі з використанням сталевих брухту. Враховуючи це, вирішення проблеми забезпечення високих якісних характеристик металопродукції за умов дедалі більшого забруднення сталевих брухту домішками кольорових металів набуває особового значення. Відсутність ефективних промислово перевірених технологій рафінування рідкого металу від міді та деяких інших кольорових металів, ускладнює вибір шихтових матеріалів і сприяє їх накопиченню у металі. Виходячи з цього, актуальність дисертаційної роботи Костецького Ю.В., присвяченої вирішенню проблеми рафінування залізвуглецевих розплавів від розчиненої міді не викликає сумнівів.

Ознайомлення з роботою засвідчує цілісний підхід до вирішення проблеми, який враховує необхідність одночасного розв'язання інших, актуальних для сучасного металургійного виробництва завдань – інтенсифікації процесу рафінування рідкого металу від неметалевих включень та удосконаленню технології продувки металу інертним газом під час позапічної обробки. Ці питання, з огляду на їх важливість для забезпечення якості металопродукції та конкурентоздатності виробництва, постійно залишаються в центрі уваги але потребують нових рішень в контексті проблематики дисертаційного дослідження.

Таким чином, можна зазначити, що дисертаційна робота Костецького Ю.В. присвячена вирішенню актуальних науково-технічних проблем і повною мірою відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 «Металургія чорних в кольорових металів та спеціальних сплавів».

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

Розгляд тексту дисертації та автореферату показав, що викладені наукові положення, висновки і рекомендації є цілком обґрунтованими і зроблені автором на підставі глибокого вивчення літературних джерел та патентно-ліцензійної літератури, а

також отриманих ним власних результатів теоретичних і експериментальних досліджень і розрахунків. Робота містить ґрунтовні висновки і рекомендації зроблені за результатами кожного розділу досліджень. У роботі використані сучасні теоретичні та експериментальні методи досліджень. Зроблені висновки базуються на загальноприйнятих наукових принципах фізичної хімії та термодинаміки металургійних систем, узгоджуються з ними та не протирічають ним. Достовірність результатів забезпечується використанням взаємодоповнюючих методів дослідження. При проведенні експериментальних досліджень в лабораторних і промислових умовах використані як стандартні, так спеціально розроблені обладнання, фізичні моделі та методики. Обробку експериментальних даних, а також математичне моделювання процесів здійснено з використанням стандартних пакетів прикладних програм.

Загальна характеристика змісту дисертації

Метою роботи є розробка наукових основ інтенсифікації та контролю процесів рафінування залізовуглецевих розплавів від міді з застосуванням методу сульфідного рафінування та наступного очищення сталі від сірки і неметалевих включень, а також методу непрямого контролю процесу продувки рідкого металу інертним газом під час позапічної обробки на підставі аналізу вібрації поверхні сталерозливного ковша.

У *вступі* автор ґрунтовно доводить актуальність теми та її відповідність стратегії розвитку вітчизняної металургійної галузі, формулює мету і задачі роботи, визначає аспекти наукової новизни та практичного значення отриманих результатів, а також надає інформацію про апробацію та публікацію основних результатів.

У *першому розділі* проаналізовано відомі методи рафінування залізовуглецевих розплавів від міді – шляхом її вилучення з рідкого металу до газової (метод випаровування) або конденсованої (рафінування флюсом) фази. Показано, що найбільш перспективним для промислового втілення є метод рафінування металевих розплавів сульфідними флюсами. Аналіз відомих досліджень з рафінування залізовуглецевих розплавів від розчиненої міді шляхом використання флюсів на основі сульфідних систем FeS–NaS_{0,5} та FeS–AlS_{1,5} засвідчує, що технологічні аспекти практичної реалізації процесу сульфідного рафінування і подальшого доведення металу в промислових умовах не досліджено.

Другий розділ присвячено термодинамічному моделюванню хімічних і фазових перетворень, що мають місце при трансфері міді з рідкого металу до сульфідної фази, та експериментальним дослідженням процесів сульфідного рафінування.

На основі термодинамічного моделювання автор робить два важливих для розробки технології висновки: по-перше, найбільш сприятливі для сульфідного рафінування умови утворюються при взаємодії з насиченими вуглецем розплавами заліза; по-друге, додавання до сульфідної фази сульфиду натрію зменшує рівноважну концентрацію сірки у металі, що сприяє збільшенню коефіцієнту розподілу міді між шлаком і металом.

З огляду на результати термодинамічного моделювання, експериментальні дослідження в роботі зосереджено на формуванні сульфідної фази, що містить сульфід натрію. Використання для цього карбонату натрію є виправданим з точки зору технологічної реалізації. Дослідження різних варіантів процесу в лабораторних умовах засвідчило перевагу одночасного введення реагентів, що стало ґрунтовною підставою для обрання саме такого способу як об'єкту для дослідно-промислових випробувань.

Окрім того, враховуючи відомі дані щодо впливу алюмінію на процес розподілення міді, автором досліджено вплив присадок металевого алюмінію у насичений сіркою метал після закінчення введення сірковмісної суміші на залишковий вміст міді в металі.

Матеріали розділу ґрунтовно доводять можливість рафінування залізвуглецевих розплавів від розчиненої міді з застосуванням методу сульфідної обробки. Для найбільш ефективного рафінування і покращення екологічних показників процесу автор рекомендує здійснювати сульфідну обробку розплаву в спеціалізованому закритому реакторі.

Третій розділ спрямовано на вирішення складних технологічних проблем сепарації сульфідної фази з рідкого металу після рафінування, а саме – видалення відпрацьованого сульфідного флюсу з дзеркала металу і очистки об'єму металу від сульфідних неметалевих включень, які містять розчинену мідь.

Виконане автором комп'ютерне моделювання процесів флотації неметалевих включень бульбашками газу та їх коагуляції з твердими рафінувальними частинками показало можливість інтенсифікації процесу видалення неметалевих включень з рідкого металу штучним введенням до розплаву твердих тугоплавких частинок, що виконують роль центрів коагуляції для сульфідних неметалевих включень з розмірами менше за 50 μm . Окрім того, дослідження на комп'ютерній моделі стали основою для технологічних рекомендацій щодо управління розподілом твердих частинок в об'ємі рідкого металу шляхом комбінування різних методів продувки металу в ковші - як одночасно з бульбашковою флотацією, так і без неї.

Четвертий розділ автор присвятив розробці двох методів інтенсифікації процесу десульфурації металу після сульфідного рафінування шляхом - введення до металу активних сульфідуютьовуючих елементів та вилучення сірки до газової фази під час окислювального рафінування металу.

Із застосуванням термодинамічного моделювання показало, що найбільш ефективним десульфуратором за умов дослідження є алюміній, що знайшло подальше експериментальне підтвердження. Також експериментально доведено можливість проведення десульфурації насиченого сіркою високовуглецевого розплаву одночасно з його зневуглецюванням при продувці газоподібним киснем.

Теоретичне дослідження впливу інтенсивності продувки металу інертним газом на процес десульфурації у агрегаті ківш-піч дозволило оцінити вплив зміни розміру продувальної плями на кінетику процесу. Визначено певні критичні рівні інтенсивності продувки коли подальше зростання інтенсивності перемішування металу може уповільнювати процес десульфурації через зменшення загальної площі контакту металу і шлаку, що стало основою для рекомендацій щодо проведення десульфурації у промислових умовах на агрегаті піч-ківш.

У *п'ятому розділі* автор розвиває теоретичні та технологічні засади моніторингу процесу продувки сталі інертним газом під час позапічної обробки на основі вимірювання вібрації поверхні сталерозливного ковша.

На основі лабораторних досліджень впливу витрати продувального газу та поверхневого натягу розплаву на спектр та інформативні діапазони частот і на потужність вібросигналу, а також дослідно-промислових досліджень на 150-тонній установці ківш-піч встановлено надійну кореляцію між інтенсивністю вібросигналу і поточною витратою інертного газу крізь пористі вставки у днищі ковшу в діапазоні частот 15-95 Гц. Обробка результатів вимірювань вібросигналу у дослідно-промислових умовах довела функціональний зв'язок між витратою аргону і потужністю, що дозволяє додатково

контролювати перебіг процесу продувки, маючи непрямі дані про поточну витрату газу. Розроблений на цій основі експериментальний зразок апаратно-програмного комплексу віброакустичного моніторингу та управління процесом продувки металу інертним газом на установці ківш-піч було успішно випробувано у промислових умовах.

Наукова новизна отриманих результатів

У дисертаційній роботі виконано комплекс теоретичних та експериментальних досліджень пірометалургійних процесів рафінування залізобуглецевих розплавів від розчиненої міді сульфідним методом і наступного видалення сірки та неметалевих включень з металу, а також розроблено теоретичні основи моніторингу та контролю продувки рідкого металу інертним газом на установці ківш-піч шляхом аналізу віброактивності поверхні розплаву.

До найбільш суттєвих наукових результатів дисертації Костецького Ю.В. слід віднести наступне:

1. Вперше показано і теоретично обґрунтовано екстремальну залежність залишкової концентрації міді у залізобуглецевому розплаві, що містить сірку, від питомої витрати карбонату натрію, який є джерелом формування сульфідів натрію у сульфідній фазі, з мінімумом в діапазоні мольної частки сульфідів натрію близько 40.

2. Вперше експериментально показано, теоретично обґрунтовано та кількісно оцінено можливість одночасного протікання процесів знебуглецювання і видалення сірки з металу у газову фазу шляхом утворення газоподібного оксиду при продувці киснем залізобуглецевого розплаву з високим вмістом вуглецю та сірки.

3. Експериментально доведено і теоретично обґрунтовано можливість використання віброакустичних сигналів з поверхні ковша для моніторингу процесу продувки інертним газом під час позапічної обробки сталі та визначено діапазон спектру вібросигналу, у якому спостерігається надійний зв'язок його потужності з витратою енергії на утворення бульбашок газу.

4. Вперше визначено функціональну залежність між кількісними параметрами вібросигналу, зареєстрованого на поверхні сталерозливального ковша в інформативному діапазоні частот, і витратою газу за різних умов продувки та різних режимів витікання газу та встановлено наявність у спектрі вібросигналу характерних частотних піків, які відповідають власній частоті коливання бульбашок газу.

5. Отримали подальшого розвитку уявлення про вплив величини поверхневого натягу розплаву на характеристики вібросигналу, який утворюється під час продувки газом крізь донний продувний пристрій. Зокрема, показано, що зменшення поверхневого натягу рідини супроводжується зниженням потужності вібросигналу через скорочення витрати енергії на утворення бульбашок газу за незмінного характеру залежності потужності вібросигналу від витрати газу на продувку.

Практичне значення отриманих результатів

Отримані в дисертаційному дослідженні результати вирішують важливу науково-технічну проблему, що має стратегічне народногосподарське значення.

За результатами проведених досліджень дисертантом розроблено наукові основи технології сульфідного рафінування залізобуглецевих розплавів в тигельній індукційній

печі з використанням суміші реагентів на основі соди і сірки, яка у дослідно-промислових умовах забезпечила зниження масової концентрації розчиненої міді з близько 1% до менш ніж 0,3%. При цьому обґрунтовано і експериментально підтверджено, що умовою ефективного процесу сульфідного рафінування є розвинена поверхня міжфазового контакту, яку доцільно створювати шляхом інтенсивного перемішування сульфідної і металевої фази з наступним їх максимально повним розділенням по завершенні рафінування.

Автором запропоновано новий метод інтенсифікації процесу рафінування рідкого металу в ковші від неметалевих включень шляхом введення в об'єм розплаву дрібних тугоплавких твердих частинок одночасно з продувкою розплаву інертним газом крізь донні пристрої.

Запропоновано новий підхід до організації процесу десульфурації насиченого сіркою внаслідок сульфідної обробки залізвуглецевого розплаву шляхом вилучення сірки до газової фази в процесі продувки рідкого металу киснем.

Експериментально показана ефективність моніторингу процесу продувки металу інертним газом у ковші під час позапічної обробки на основі аналізу віброакустичних даних з поверхні ковша. Розроблений пілотний зразок апаратно-програмного комплексу моніторингу і автоматичного управління продувкою металу інертним газом на установці ківш-піч успішно випробувано у промислових умовах ККЦ Єнакіївського металургійного заводу та заплановано до використання на ПАТ «Енергомашпецсталь» (м. Краматорськ).

Вказані розробки також є перспективними до використання на інших металургійних підприємствах в Україні та за кордоном.

Основні положення дисертації використовуються в процесі підготовки фахівців у вищих навчальних закладах України. Зокрема, 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 викладено у 55 наукових працях, серед яких 21 стаття у наукових фахових виданнях, 2 статті у виданнях, що індексуються у наукометричній базі Scopus, 3 статті у періодичних наукових виданнях та 4 патенти. Матеріали дисертаційного дослідження пройшли апробацію на 25 наукових та науково-технічних конференціях в Україні та за кордоном.

Публікації в достатній мірі відображають основні положення дисертації.

Автореферат містить всю необхідну інформацію для оцінки дисертації, цілком ній ідентичний, включає всі її основні наукові положення, висновки і рекомендації.

Основні зауваження по дисертації

1. В першому розділі зазначається, що найкращім вибором для здійснення сульфідного рафінування від міді є сульфідні системи на базі сульфідів алюмінію та натрію, але далі, у розділі 2.1, автор зазначає, що найбільший інтерес з практичної точки зору має сульфідна система з сульфідом натрію, не обґрунтовуючи це ствердження і не пояснюючи її переваги перед сульфідною системою на базі сульфиду алюмінію.

2. У другому розділі при описі результатів лабораторного дослідження сульфідного рафінування не наведено дані щодо кількості утвореної сульфідної фази, що ускладнює оцінку ефективності використання реагентів.
3. У другому розділі розглянуто використання присадок металевого алюмінію до металу для покращення результатів сульфідної обробки, але не досліджено варіант з введенням алюмінію у метал ще до початку сульфідної обробки. Також не зрозуміло чому алюміній не використовували в експериментах з переливанням металу (розділ 2.5).
4. В експериментальних дослідженнях не оцінено втрати тепла металом під час сульфідного рафінування.
5. В третьому розділі при комп'ютерному моделюванні процесу видалення неметалевих включень не враховано і не розглянуто одночасне протікання процесів бульбашкової флотації і видалення неметалевих включень за рахунок їх взаємодії з твердими частинками. Це викликає певне здивування, оскільки автор розглядає введення твердих частинок в метал одночасно з його продуванням газом крізь донні фурми.
6. В роботі бажано було б оцінити техніко-економічні показники процесу виробництва з застосуванням сульфідного рафінування за запропонованими в розділі 4.4 схемами.
7. На рис. 3.35 не позначені і не пояснені два з чотирьох зображень (у верхньому рядку).
8. На рисунках 5.29, 5.28, 5.31 не пояснені позначення В і Н на кривих.

Наведені зауваження не знижують теоретичну та практичну цінність роботи, не ставлять під сумнів достовірність матеріалів дисертації.

Висновки щодо відповідності дисертації вимогам Міністерства освіти та науки України

Дисертація Костецького Юрія Віталійовича є закінченою науковою працею, в якій на підставі узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень вирішено важливу комплексну науково-технічну проблему з удосконалення рафінувальної обробки залізобуглецевих розплавів та підвищення ефективності технологічної схеми виробництва сталі.

Дисертаційна робота за своєю вагомістю, новизною наукових результатів, їх практичним значенням, за кількістю та якістю публікацій відповідає вимогам п. 11 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567, а її автор – Костецький Юрій Віталійович заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.16.02 «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

Офіційний опонент
доктор технічних наук, професор
кафедри металургії чавуну,
проректор з науково-педагогічної роботи
Національної металургійної академії України



В. І. Шатоха