

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

## ВІДГУК

### Офіційного опонента

доктора технічних наук, професора Макурова Сергія Леонідовича на дисертаційну роботу Снігури Ірини Романівни «Розробка критеріїв та комплексних показників для опису фізико-хімічних взаємодій в системі «метал-шлак» при позапічній обробці сталі», яку представлено на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів»

#### 1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Сучасним трендом отримання якісної металопродукції є включення у металургійний цикл виробництва спеціальних сталей та сплавів, стадії їх позапічної обробки, зокрема на установці типу ківш-піч. Застосування у технологічній схемі даного агрегату відкрило перспективу розробки унікальних способів розкислення, рафінування та доведення сталі за хімічним складом методами легування й мікролегування з використанням потенційних можливостей фізико-хімічної природи і фізичної структури розплавів. Прогноз та коригування вмісту шкідливих домішок (сірки та фосфору) наряду з вмістом основних складових розплаву (кремній, марганець) металургійного напівпродукту представляють собою важливу науково-технічну задачу, яку можна вирішити шляхом системного аналізу технологічних аспектів виробництва і розробкою нових наукових підходів щодо оцінки ступеню їх засвоєння виражених у коефіцієнтах розподілу елементів у системі «метал-шлак».

Опис фізико-хімічних взаємодій між металевою і шлаковою фазами та оцінка ефективності їх протікання і формування складу й структури металевого розплаву був й залишається актуальним питанням серед фахівців-металургів. Саме цим аспектам присвячена рецензована робота і у такому контексті зазначена тематика дисертаційної роботи Снігури І.Р., яка звучить актуально для потреб сучасного металургійного виробництва. Виконана здобувачем робота пов'язана з тематичними планами досліджень бюджетної та договірної тематики Інституту чорної металургії ім. З.І.Некрасова НАН України, що додатково підтверджує її актуальність.

## **2. Наукова новизна отриманих результатів**

Пошук науково-обґрунтованих підходів щодо визначення ступеню засвоєння добавок та закономірностей їх розподілення між металевою і шлаковою фазами є предметом багатьох досліджень, однак і досі залишається дискусійним. Заслуга дисертанта полягає у вдалому поєднанні теоретичних уявлень з реальними промисловими дослідженнями, які базуються на використанні можливостей сучасних програмних засобів математичного моделювання, що дозволило по новому трактувати фізико-хімічні процеси перерозподілу елементів у напрямку метал-шлак.

Проведений експертний аналіз викладених в дисертації Снігури І.Р. наукових положень та висновків дозволяє виділити ряд суттєво нових наукових результатів, отриманих особисто автором, до яких слід віднести наступні:

- Вперше запропоновано використати у якості критерію мікронеоднорідності структури металевих розплавів параметр спрямованої зарядової щільності  $\rho_1$  при їх моделюванні з позицій концепції спрямованого хімічного зв'язку. Суть його полягає у вираженні відношення числа електронів локалізованих в напрямку найкоротшої відстані між реагентами ( $e/nm$ ). Алгоритм розрахунку в достатній мірі висвітлено у матеріалах дисертаційної роботи. Вказаний параметр відображає міцність зв'язків між атомами розплаву, що обумовлює

підбір необхідних технологічних рішень при доводці сталі з метою підвищення ступеню засвоєння добавок, що додаються.

- Теоретично обґрунтований критерій хімічної активності елементу -  $\text{tg}\alpha$  та показана доцільність його врахування у процесах розподілу елементів між фазами систем металу й шлаку. Значимість даного критерію полягає у відображенні градієнту зміни радіусу іону елементу ( $R_e$ ) від його заряду ( $Z_e$ ), а отже оцінці ефективності процесів переходу добавок у затребуваному напрямку з метою формування відповідного хімічного складу згідно замовлення споживача металопродукції.

- Показано, що врахування параметрів мікронеоднорідності ( $\rho_l$ ) та хімічної активності ( $\text{tg}\alpha$ ) разом з інтегральними параметрами зарядового ( $Z^Y$ ) і структурного ( $d$ ) стану залізобуглецевого розплаву підвищує порівняно з емпіричними рівняннями вираженими лише через хімічний склад, точність прогнозу фізико-хімічних та теплофізичних властивостей металевих розплавів ( $R^2 \geq 0.95$ ). Визначені залежності параметрів дають можливість раціоналізувати вибір добавок до розплаву сталі відповідних сплавів, феросплавів, ШОС при позапічній її обробці.

- Обґрунтовано новий підхід до визначення коефіцієнтів розподілу елементів в системі «метал-шлак» за інтегральними параметрами міжатомної взаємодії та фізико-хімічними й теплофізичними властивостями добавок з урахуванням технологічних режимів позапічної обробки сталі. Запропонований підхід дозволяє провести оцінку ступеня завершеності процесів рафінування і легування та уточнити технологічну схему отримання металу заданого складу.

### **3. Практична цінність дисертаційної роботи**

Беззаперечний практичний інтерес представляє актуалізація новими експериментальними даними з літературних джерел та реальними промисловими (паспортів плавок), щодо хімічного складу металевих і шлакових розплавів, їх фізико-хімічних та теплофізичних властивостей, технології виробництва інформаційної бази банку даних «Металургія», яка

створена в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова та являється ядром при вирішенні нагальних проблем сталеплавильного й доменного виробництв.

Слід відмітити значимість запропонованих автором математичних моделей для прогнозування ряду властивостей феросплавів, сталей та сплавів і оригінальність методики розрахунку розподілу сірки, кремнію, марганцю в системі «метал-шлак» з позиції поєднання ланцюгового зв'язку по принципу: «склад – структура – технологія – властивості».

Запропонований варіант сталерозливного ківша для позапічної обробки металу зі зміною розміщення продувочної фурми у його днищі в умовах виробництва ПрАТ «Дніпроспецсталь» забезпечив вагомий економічний ефект за рахунок підвищення стійкості футерівки на 5 плавок, зниження об'єму застійних зон у ванні ковша на 12,5%, зменшенню перегріву металу на 17,7%, що підтверджено патентом.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень відображених у дисертаційній роботі використовуються у навчальному процесі при викладанні дисциплін на кафедрі теорії металургійних процесів та хімії у Національній металургійній академії України за спеціальністю 05.16.02 – «Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів».

#### **4. Достовірність наукових положень і висновків дисертаційної роботи**

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій є результатом використання в роботі сучасних методів математичного моделювання, фізико-хімічної обґрунтованості та коректності запропонованих методик, перевірки одержаних результатів різними методами, в тому числі експериментальні дослідження та промислові випробування розроблених технічних рішень. Теоретичні дослідження ґрунтувались на фундаментальних положеннях концепції спрямованого хімічного зв'язку розробленої Приходько Е.В, термодинаміки, фундаментальних положеннях системного аналізу та враховували сучасні уявлення про вплив хімічного складу розплаву на розподіл елементів.

Наукові положення і висновки автора узгоджуються із загальноприйнятими положеннями теорії металургійних процесів. Точність представлених у роботі результатів і залежностей є достатньою для їх подальшого практичного використання.

#### **5. Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях**

Основний зміст, наукові положення, результати і висновки дисертаційної роботи досить повно висвітлені в 15 наукових публікаціях, а саме: 5 статей в спеціалізованих наукових виданнях, затверджених ВАК України, 1 стаття в іноземному виданні, що увійшла до Scopus, 7 доповідей на фахових науково-технічних конференціях, в тому числі міжнародних, 1 патент України, 1 авторське свідоцтво. Перелік публікацій, їх зміст та обсяг відповідають темі дисертації та у повній мірі відображають основні положення, наукові результати та висновки роботи дисертанта.

#### **6. Оцінка змісту дисертаційної роботи та її завершеності**

Представлена дисертаційна робота Снігури І.Р. складається з вступу, п'яти розділів основного тексту, висновків та переліку використаних джерел. Дисертація містить титульний аркуш, необхідні анотації, зміст та висновки після кожного з розділів та загальні по викладеному матеріалі.

У вступі обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету і завдання дослідження, наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, відзначено особистий внесок автора в публікаціях, перераховано конференції на яких проходила апробація результатів роботи, наведено структура і обсяг дисертації.

У першому розділі виконано критичний аналіз з позицій порівняння переваг і недоліків й відображено еволюційну зміну поглядів щодо опису будови металевих та шлакових розплавів. Приведено відомості про сучасні підходи до оцінки ступеню засвоєння, розподілу, способи введення легуючих, рафінуючих, модифікуючих добавок у межах сталеплавильного

виробництва, зокрема сектору позапічної обробки на установці ківш-піч.

Показана перспективність застосування відправних позицій концепції спрямованого хімічного зв'язку при описі структури металевих і шлакових розплавів, як хімічно єдиних систем.

Обґрунтована необхідність створення інформаційного середовища у вигляді баз даних, що дозволяє здійснити формування репрезентативних вибірок для вирішення задач прогнозування властивостей металевих і шлакових розплавів та результатів їх взаємодій.

Безсумнівний науковий інтерес представляють результати **другого розділу**, який присвячений дослідженням властивостей розплавів сталей, сплавів, феросплавів та формуванню структурних складових прогнозних моделей, їх фізико-хімічних й теплофізичних властивостей на основі виявлених закономірностей впливу зміни хімічного складу досліджуваних систем виражених у параметрах міжатомної взаємодії. Представлено результати експертної оцінки точності розроблених аналітичних виразів у порівнянні з даними інших авторів та комерційного спеціалізованого продукту (JMatPro), доступ до якого отриманий у результаті проведення спільних досліджень автора з фахівцями Падерборнського університету (Німеччина), що підтверджує стійкість та адекватність моделей. Важливим результуючим ефектом виконання здобувачем даного розділу є сформований комплекс прогнозних моделей з урахуванням індивідуальних особливостей для різних класів сталей та сплавів, що є найбільш затребуваними на даний час у металургійній галузі.

**У третьому розділі** автором виконаний аналіз сучасних публікацій науковців-металургів та практиків сталеплавів по виявленню ролі шлаку у формуванні властивостей сталей. Обґрунтована необхідність врахування значимості фізико-хімічних властивостей шлаків та функцій, що вони виконують по відношенню до металу на рівні повноправної важливої складової, яка забезпечує стабільність якості сталі, зокрема по вмісту шкідливих домішок сірки й фосфору. Представлено результати розрахунку

термодинамічних властивостей потенційно можливих варіантів десульфураторів ( $MgO$ ,  $MnO$ ,  $CaO$ ,  $CaF_2$ ) металу, що узгоджується з даними хімічного аналізу шлаку при виплавці сталі 09Г2С в умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (ДМК). Автором актуалізована наявна в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова база «Шлак» промисловими даними які охоплюють сталеплавильні шлаки заводів ДМК (20тр, 4тр, С45R, 09Г2С і її модифікації) і ПрАТ «Дніпроспецсталь» (ДСС) (Х12МФ, ШХ-15, 40Х2МА, 18ХГТ, 9Г2Ф та інші) при виплавці сталей широкого сортаментного ряду, що слугувало інформаційним ядром для подальшого аналізу та виявлення закономірностей розподілу елементів при обробці на установці ківш-піч.

У четвертому розділі наведено результати узагальнюючого аналізу іонообмінних процесів у системі «метал-шлак», а у якості наукового підґрунтя обрана концепція спрямованого хімічного зв'язку з закладеною в ній унікальною ідеєю про узгоджений характер іонообмінних процесів та абстрагування від запису звичних термодинамічних реакцій. Направленість іонообмінних процесів автор розкриває через хімічну активність компонентів, як важливої ланки по розробці оптимізаційних рішень щодо коригування хімічного складу добавок, що вводять, зокрема при позапічній обробці сталі. Вперше запропоновано автором у якості критерію хімічної активності використати параметр  $tg\alpha$ , який враховує зміну радіусу іона від його заряду по відношенню до конкретного партнера при їх взаємодії. Ефект перезарядки та значимості вказаного критерію графічно продемонстровано на зміні активності кремнію у складі систем з залізом та кобальтом. На основі математично-статистичної обробки накопичених дисертантом даних проведена оцінка наближення досліджуваних різноцільових розплавів, зокрема трубної та підшипникової сталі до рівноважного стану по розподілу сірки та фосфору у різних промислових умовах. Показано, що термодинамічний потенціал та ємність шлаку при порівнянні рівноважного та фактичного використані не повноцінно. При застосуванні конструкційної

зміни розміщення продувочної фурми у днищі ковша на ПрАТ «Дніпроспецсталь» коефіцієнт розподілу сірки для сталі ШХ-15 і її модифікацій по новій технології зріс на 28% по відношенню до плавки зі старою технологією, що підтверджено патентом. Для трубних марок сталей, які виготовляються в умовах ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат», автором встановлено, що для забезпечення максимальної сіркопоглинаючої здатності є оптимальне співвідношення  $\text{CaO} / \text{Al}_2\text{O}_3$  на рівні  $6 \div 12$ , а дефосфоруючої здатності співвідношенням  $(\text{CaO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2 - 2 \div 4$ .

У п'ятому розділі обґрунтовано новий підхід до визначення коефіцієнтів розподілу елементів, зокрема кремнію, марганцю, сірки в системі «метал-шлак» за інтегральними параметрами міжатомної взаємодії та фізико-хімічними й теплофізичними властивостями добавок з урахуванням технологічних режимів позапічної обробки сталі на прикладі сталей 09Г2С та ШХ-15. Ефективність процесу розподілу елементів між металом та шлаком запропоновано оцінювати по його відносній зміні в порівнянні з початковим. У заключній частині п'ятого розділу дисертантом представлена концептуальна блок-схема реалізації алгоритму по прогнозуванню продуктів плавки з урахуванням ефективності розподілу елементів між металевою і шлаковою фазами на основі концепції спрямованого хімічного зв'язку.

Вважаю за потрібне відмітити, що у представленій до захисту роботі Снігури І.Р. чітко сформульовані поставлені задачі, які вирішуються методично, коректно й послідовно. В цілому дисертація відрізняється логічним викладенням наукових матеріалів дослідження і оформлена відповідно до існуючих норм. Підтверджена у промислових умовах ефективність розроблених в роботі методів, новизна, обґрунтованість і практична цінність отриманих результатів, їх достовірність, а також відповідність поставлених задач і висновків свідчать про закінченість дисертації. Зміст роботи відповідає паспорту спеціальності 05.16.02 – Металургія чорних і кольорових металів та спеціальних сплавів.

## 7. Загальні зауваження до дисертаційної роботи:

Згідно тексту дисертації та автореферату є ряд зауважень та рекомендацій:

1. Слід відмітити, що автор у розділі 1 дисертації детально проаналізував розвиток підходів до трактування будови металевих й шлакових розплавів та їх сучасні уявлення. Розділ видався досить громіздким та інформаційно перенасиченим. Вірогідно було його доцільніше розформувати на дві відокремлені частини і у другу виділити створення відповідного інформаційного забезпечення.
2. Автором (розділ 2, рис. 2.5) показана залежність температури кластерів від параметру спрямованої зарядової щільності та відмічено, що для руйнування кластерних мікрообластей необхідно надавати тепло системі, а підбір компонентів розплаву здійснювати з позицій їх близькості по температурам існування упорядкованих областей, що забезпечить зменшення перегріву металу та покращення його якості, але конкретні приклади розрахунків граничних значень не приводяться.
3. Розділ 3 бажано у більшій мірі було б доповнити елементами досліджень конкретних шлакових розплавів, що використовувались при обґрунтуванні технологічних рішень розглянутих марок сталей.
4. Автор по тексту дисертаційної роботи часто використовує термін «найбільш інформативний параметр», але не ясно яким чином визначається ця інформативність.
5. З роботи не ясно, яка наочність сформованих вибірок даних на основі яких розроблені регресійні рівняння, зокрема розділу 2 та 5. Варто було б доповнити роботу більшою кількістю табличних даних хімічних складів досліджуваних розплавів, що дозволило б оцінити масштабність проведених досліджень і охопленість сортаментного ряду сталей та сплавів.
6. У дисертації відсутні дані про конкретне місце нового розміщення продувочної фурми у днищі ковша по запропонованій технологічній схемі чи відхилення у градусах від її попереднього розташування.

7. У розділі 5 автор розглядає у якості технологічного фактору впливу на розподіл елементів тільки інтенсивності продувки. Не ясно чи проведено аналіз інших параметрів технології обробки напівпродукту на установці ківш-піч.
8. На мою думку, у якості «заключного акорду» дисертації слід було б представити результати хоча б пілотного варіанту реалізації розробленого алгоритму розподілу елементів у системі «метал-шлак» у вигляді наскрізного програмного модулю або ж його заготовки, що вдаліше описує завершений цикл представлених автором досліджень.
9. Зміст автореферату цілком відповідає змісту дисертації. Дисертація та автореферат написані грамотною технічною мовою. Але інколи трапляються невдалі формулювання з точки зору української стилістики, наприклад «висхідних» замість «вихідних».

Кількість поставлених питань і зауважень більше свідчить про цікавість проведених дисертантом досліджень та не ставлять під сумнів достовірність одержаних результатів, їх основних наукових та практичних положень. Наведені зауваження не знижують загальної оцінки та враження від дисертаційної роботи Снігури І.Р., яка виконана на достатньому науково-технічному рівні.

**8. Висновок про відповідність дисертації обраній спеціальності, профілю спеціалізованої вченої ради, вимогам п. 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24 липня 2013 р.**

Дисертаційна робота Снігури І.Р., яку представлено на здобуття наукового ступеню кандидата технічних наук, є завершеним науковим дослідженням. Аналіз новизни й значущості наукових і практичних результатів, висновків і рекомендацій дозволяють стверджувати про відповідність дисертаційної роботи вимогам пунктів 9, 10, 12, 13, 14 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» № 567 від 24 липня 2013 р. (зі змінами)

та нормативним документам Міністерства освіти і науки України. Наукові і прикладні результати дисертації достатньою мірою висвітлені у 15 наукових роботах. Кількість, обсяг та рівень видання публікацій відповідають вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України. Аналіз особистого внеску автора роботи вказує на високий ступінь самостійності виконання досліджень та публікування їх результатів.

Таким чином, на основі представленого вище оцінювання в цілому дисертаційної роботи Снігури І.Р. «Розробка критеріїв та комплексних показників для опису фізико-хімічних взаємодій в системі «метал-шлак» при позапічній обробці сталі» вважаю, що дисертаційна робота повністю відповідає вимогам Департаменту атестації кадрів вищої кваліфікації МОН України щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Снігура Ірина Романівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня кандидата 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

*Світлана Мисирова С.Л.*  
ЗАСВІДЧУЮ  
НАЧ. ЗАГАЛЬНОГО  
ВІДДІЛУ  
Т.О.  
*Зав*  
*07.04.2024*

