

## **ВІДГУК**

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Рубана Володимира Олександровича**

**«Розробка енергозберігаючої технології обробки металу на установці «ківш-піч» при використанні графітованого порожнистого електрода»,**

представленої на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 - «Металургія» 13 «Механічна інженерія»

### **Актуальність обраної теми**

Дисертаційна робота Рубана Володимира Олександровича присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми - розробці енергозберігаючої технології нагріву металу при використанні графітованого порожнистого електрода під час його позапічної обробки на установці ківш-піч.

Практика сучасного виробництва сталі на металургійних і машинобудівних підприємства світу і зокрема в Україні пов'язана з застосуванням різноманітних засобів та обладнання позапічної обробки металу. Серед найбільш поширених особливе місце належить використанню установок ківш-піч (УКП). Це спеціалізоване обладнання на вітчизняних підприємствах з'явилося у другій половині минулого століття. Сьогодні за допомогою УКП виробляється сталь широкого сортаменту і призначення від рядових вуглецевих до спеціальних високолегованих марок. Застосування УКП дозволяє здійснювати такі важливі технологічні операції як доведення сталі за хімічним складом та температурою, розкислення та рафінування металу, його легування чи мікролегування, отримання вмісту хімічних елементів у вузьких межах та ін.

УКП є енергоємним обладнанням і його використання супроводжується значними матеріальними і енергетичними витратами (електроенергія, газ, графітовані електроди, тощо). Обробка рідкого металу на такому обладнанні здійснюється у сталерозливних ківшах і супроводжується великими втратами теплоти, що потребує його періодичного підігріву перед розливом.

У зв'язку з цим процеси позапічної обробки металу на УКП потребують постійної уваги і вдосконалення з метою підвищення їх енергозаощадження і скорочення матеріальних витрат.

Результати досліджень дисертанта і розроблена технологічна пропозиція з використання на УКП графітованих порожнистих електродів дозволяє в певній мірі вирішити перелічені питання, є підставою для подальшого розвитку цього напрямку.

Виконання дисертаційної роботи пов'язано з тематичними планами держбюджетних науково-дослідних робіт Українського державного університету науки і технологій.

Тому все вищенаведене характеризує тему дисертаційної роботи, що рецензується, як актуальну і підтверджує її відповідність встановленим вимогам за ознакою «актуальність обраної теми дисертації».

### **Оцінка структури та змісту дисертації**

Дисертаційна робота складається з вступу, основної частини (чотири розділи з висновками по кожному), загальних висновків, переліку посилань з 139 найменувань публікацій закордонних і вітчизняних авторів на 15 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи викладено на 136 сторінках машинописного тексту, з яких 120 сторінок основного тексту, містить 30 рисунків, 14 таблиць.

У **Вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, надано інформацію щодо зв'язку роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету роботи та завдання досліджень, вказано об'єкт, предмет та методи досліджень, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведені відомості про особистий внесок здобувача, апробації результатів роботи, представлені дані стосовно публікацій по темі роботи, структури та обсягу дисертації.

У *першому розділі* викладено аналітичний огляд режимів експлуатації та параметрів ефективності роботи УКП. Наведені приклади сучасних розробок стосовно енергозаощадження процесів обробки металу на УКП.

Обґрунтовано вибір напрямку досліджень і сформульовані завдання дисертаційної роботи.

У *другому розділі* наведені відомості по створенню обладнання і проведенню фізичного моделювання вдування газу каналом графітованого порожнистого електроду. Викладені результати розрахунку параметрів лунки сформованої під дією електричної дуги без подачі газу при позапічній обробці

сталі на УКП. Глибина лунки при використанні суцільного електрода, за обраних параметрів, складає близько 40 мм.

Розраховано критерії подібності, створено установку для холодного моделювання і проведено фізичне моделювання на ізотермічній моделі спільного впливу імпульсу дуги і газового струменя на геометричні параметри лунки. За результатами проведеного фізичного моделювання отримані дані щодо стану металеві ванни при продувці каналом графітованого порожнистого електрода (ГПЕ) газу з витратами 3–20 м<sup>3</sup>/год при висоті шлакового покриву 100 – 200 мм. Отримані дані щодо залежності глибини і площі лунки металу від витрати газу та висоти шлакового покриву. Запропоновані раціональні витрати газу який подається каналом ГПЕ: при висоті шлаку 100 мм вони складають 3–6 м<sup>3</sup>/год, а при висоті 200 мм – 6–10 м<sup>3</sup>/год.

Результати фізичного моделювання геометричних параметрів лунки виявились підставою для подальшій запланованих досліджень.

У *третьому розділі* викладені методики та методи чисельного моделювання експлуатації ГПЕ, а саме його впливу на теплову роботу на УКП. Проведені розрахунки термодинаміки процесів дисоціації та відновлення оксидів Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, MgO, SiO<sub>2</sub>, MnO, TiO<sub>2</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, FeO, CO в зоні горіння дуги з використанням сучасного програмного продукту. Також використано модуль і створено 3D модель, що дозволило проводити розрахунки нестационарного теплообміну для опису теплових процесів, що відбуваються при позапічній обробці сталі. Розраховано теплові умови експлуатації ГПЕ щодо зовнішньої, внутрішньої та торцевої поверхонь в різних періодах нагріву електроду з врахуванням особливостей кожного. З врахуванням можливості впливу зміни геометричних параметрів лунки на ефективність передачі теплоти від дуги до металевого розплаву проведено комп'ютерне моделювання нестационарної теплопередачі у системі «плазма–шлак–метал». За допомогою програмного продукту «Ansys» (пакет «DesignModeler») була створена 3D модель сталерозливного ківша з рідким металом і зоною лунки утвореної під дією

електричної дуги та газу. Виконано порівняння впливу товщини шлакового покриву і витрат газу на теплову роботу УКП. З використанням метода Сімпсона проведено розрахунок приросту питомого тепловмісту сталі.

У четвертому розділі отримано данні про температурні інтервали протікання процесів дисоціації і відновлення усього переліку оксидів, що розглядаються (вказані у третьому розділі). Розраховані значення зміни енергії Гіббса у діапазоні температур 0-7000 °С. Визначено, що процес відновлення оксидів металів вуглецем відбувається у більш низькому діапазоні температур ніж мимовільний процес дисоціації обраних металевих оксидів. Встановлено дані процесу відновлення оксиду заліза за участі вуглецю, кремнію і алюмінію в залежності від температури.

Досліджено температурний градієнт ГПЕ за періодами обробки металу на УКП і представлено температурне поле 3D моделі ГПЕ у кожному періоді обробки сталі. Також отримано дані щодо температурного розподілу по довжині електрода на зовнішній і внутрішній поверхні, встановлені градієнти температури по довжині електрода в різні періоди експлуатації. Температурні розрахунки теплового стану ГПЕ дозволяють здійснити розрахунки оптимальних режимів подачі газу через канал електрода на різних етапах позапічної обробки, що дозволить зменшити температурні навантаження на електрод. Встановлено, що подача нейтрального газу каналом ГПЕ з витратами 3 м<sup>3</sup>/год зміщує високотемпературну зону до периферії, що сприяє більш рівномірному розповсюдженню температури його об'ємом.

Здійснено моделювання теплообміну у системі «плазма-шлак-метал» з урахуванням зміни геометрії лунки та утворення додаткових конвекційних потоків через вдування газу каналом ГПЕ. Визначено частини теплоти, які передаються металу окремо випромінюванням та конвекційною теплопередачею. Розраховано та побудовано діаграми відсотка теплоти поглинутої металевою ванною і шлаковим покривом при використанні звичайного ГЕ без подачі газу та ГПЕ з подачею газу його каналом 4,5 м<sup>3</sup>/год і 8 м<sup>3</sup>/год при висоті шару шлаку 100 мм і 200 мм відповідно. Визначено, що

при використанні ГПЕ з подачею газу каналом останнього, частина корисної теплоти отриманої металом зростає на 1,83 % в порівнянні зі звичайним ГЕ за рахунок збільшення корисної площі поверхні теплообміну. Вдування газу каналом ГПЕ призводить до збільшення приросту швидкості нагрівання металу залежно від інтенсивності витрат газу і висоти шлаку від 0,2 до 0,6 °С/хв.

**У Загальних висновках** викладено найбільш важливі наукові та практичні результати, що були отримані в процесі виконання дисертаційних досліджень і які сприяли розв'язанню сформульованого науково-прикладного завдання.

**Перелік посилань**, які були використані здобувачем в аналітичному огляді завдання, достатньо повно охоплює зазначену галузь знань та відображає основні напрями розвитку досліджень та технології позапічної обробки металу, а саме підігріву рідкої металевої ванни на УКП.

**Оцінка оформлення, мови і стилю дисертації.** Матеріали дисертації викладені послідовно, а їх оформлення відповідає вимогам щодо дисертацій на присвоєння вченого звання доктора філософії. Мова і стиль дисертації забезпечують доступність сприйняття викладених матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертація написана та оформлена відповідно до вимог щодо дисертацій доктора філософії.

#### **Наукові результати дисертації**

1. Вперше отримані відомості щодо спільного впливу імпульсу електричної дуги і газового струменю, який подається каналом ГПЕ на змінення геометричних параметрів лунки. Показано, що подача газу каналом ГПЕ збільшує поверхню теплообміну. На основі обробки експериментальних даних отримані аналітичні вирази, що показують спільний вплив імпульсу електричної дуги і газового струменю, які впливають на характеристику теплообміну.
2. Встановлено закономірності формування температурного поля та визначено вплив подачі газу на змінення температурних показників ГПЕ в

процесі його експлуатації на установці «ківш-піч». Визначено, що в періоди експлуатації електрода без подачі струму спостерігається утворення локально перегрітої зони в його нижній частині, що має форму сплющеного уздовж осі тора, на формування якої впливає теплота, яка була акумульована електродом в попередньому періоді нагріву.

3. Шляхом чисельного моделювання з використанням детермінованих моделей встановлено, що частина теплоти отриманої металом випромінюванням збільшується за рахунок подачі газу каналом порожнистого електрода і сягає величини 86,89 %.

### **Практичні результати дисертації**

Проведені дослідження дозволили отримати математичні моделі для описання форми і розмірів лунки сформованої в піделектродній зоні на установці «ківш-піч» при подачі газу ГПЕ. Показано, що подача нейтрального газу за обраних витрат, які становлять від 3 до 10 м<sup>3</sup>/год при висоті шлакового покриву 100–200 мм збільшує площу поверхні металевої лунки в 1,1 – 1,7 рази. За рахунок цього покращуються умови передачі теплоти від дуги до металевої ванни.

Отримані дані зміни енергії Гіббса процесів дисоціації і відновлення порошкоподібних оксидів металів, які подаються каналом ГПЕ в реакційну зону під електродом при температурах горіння електричної дуги. Визначено, що протікання реакцій дисоціацій відбувається в діапазоні температур 4050–6800 °С, у той час як відновлення – 800–3000 °С. Показано доцільність використання вуглецю у якості відновника за температур горіння дуги 3000–7000 °С.

Отримані дані градієнту температур в об'ємі ГПЕ з подачею газу його каналом під час позапічної обробки сталі на УКП. Так, в періоди нагріву на торці електрода градієнт температур складає від 6,57 °С/мм до 8,29 °С/мм, а в періоди охолодження суттєво знижується і від епіцентру тора до торця електрода складає 1,47 °С/мм, до внутрішньої та зовнішньої поверхонь – 0,38 °С/мм і 3,61 °С/мм відповідно.

Встановлено важливі показники стосовно теплової роботи установки «ківш-піч» в піделектродній зоні, які в подальшому можуть бути використані для вдосконалення виробничих процесів. Визначено вплив зміни геометричних параметрів реакційної зони під електродом на приріст температури ванни. Так, максимальні значення приросту температури металу склали 0,6 °C/хв.

Отримані дані дають змогу: знизити процес окислення графітованого електрода шляхом екрануванням інертним газом, особливо в зоні високих температур, за рахунок висхідних потоків аргону; покращити теплову роботу електрода; збільшити кількість теплоти переданої металевій ванні.

Новизна технічних рішень захищена патентом на корисну модель «Спосіб обробки рідкого металу в агрегаті ківш-піч» (№ 147183 від 21.04.2021 р.). Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в рамках виконання науково-дослідницьких робіт та впроваджені в навчальний процес Українського державного університету науки і технологій при підготовці магістрів за спеціальністю 136-Металургія.

### **Зауваження по дисертаційній роботі та її оформленню**

По дисертаційній роботі треба зробити наступні зауваження:

1. У розділах «Список публікацій», «Особистий внесок автора» та «Апробація результатів роботи» здобувача вказано 23 роботи, з яких лише дві (1 і 15 з першого розділу) наведені у «Переліку посилань». Треба пояснити, чому саме зроблений такий вибір і чому не перелічені всі публікації?
2. У «Вступі» (стор.17, абзац 3) стверджується що «вдування газу каналом порожнистого електрода призводить до зміни геометричних параметрів лунки металу...», хоча це є предметом дослідження. На стор.28 (у 1-ому абзаці) не зовсім коректно вказано, що при «збільшенні товщини шлакового шару частина електричного струму замикає електроди через шлак замість того, щоб проходити через електричні дуги та рідкий метал». Необхідно пояснити, як замикається електричний струм у шлаку.

3. На стор.35 (останній абзац) зроблено не коректне посилання на публікації [29,30] з затвердженням, що в них не було враховано конструктивне розташування донного продувного блоку і режими продування аргоном при його різних витратах.
4. Рис.1.6 на стор.47 потребує наведення позначень.
5. Потребує пояснення яким чином здійснено перехід від прийнятих умов експерименту до промислових умов з ківшом ємністю 250т і врахуванням наведених на рис.2.7 та 2.8 (стор.77 та 78 відповідно) даних стосовно залежності площі і глибини лунки від витрат газу та висоти шару шлаку, а також раціональних параметрів.
6. Наведене на стор.108 затвердження, що «Зміна витрати газу та його типу не буде суттєво впливати на температурне поле ГПЕ, оскільки за умов обробки низька витрата будь-якого газу буде забезпечувати стійкий ламінарний режим його руху. Це забезпечить майже незмінну величину коефіцієнта конвекційної тепловіддачі» не аргументоване і потребує пояснення.
7. Необхідно було б конкретизувати температурні умови в каналі електрода, які дозволяють розраховувати нагрів сипких матеріалів різного складу та властивостей, що рухаються каналом ГПЕ (стор.108, абзац 4).
8. Потребує пояснення, з яких міркувань в п.3 «Наукові результати» вказана доля теплоти що передається металу випромінюванням - 86,89%, а не 92,75%, яка наведена на рис. 4.10 при визначених витратах газу та як можна пояснити, що для висоти шлакового покриву 200 мм і витратах газу 6–10 м<sup>3</sup>/год, частина теплоти, яка передається металу склала відповідно – 8,98–13,01 %, хоча на вказаному рисунку фігурує значення 13,11%.
9. У рукопису дисертації зустрічаються орфографічні та стилістичні помилки, які безпосередньо передані здобувачу.

В той же час, перелічені зауваження не мають принципового характеру і не впливають на, в цілому, позитивну оцінку дисертації.

**Відповідність змісту дисертації спеціальності**



Дисертаційна робота Рубана В.О. «Розробка енергозберігаючої технології обробки металу на установці «ківш-піч» при використанні графітованого порожнистого електрода» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 136 - «Металургія».

### **Загальний висновок та оцінка роботи**

Дисертаційна робота Рубана В.О. на тему «Розробка енергозберігаючої технології обробки металу на установці «ківш-піч» при використанні графітованого порожнистого електрода» є завершеним науково – прикладним дослідженням, виконаним на високому науковому рівні та відповідає вимогам, передбаченим «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» (затвердженого постановою Кабінету Міністрів України №44 від 12 січня 2022р.), положенням Вимог до оформлення дисертації (затверджених наказом Міністерства освіти і науки України №40 від 12 січня 2017р.), а здобувач **Рубан Володимир Олександрович** заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – «Металургія».

Офіційний опонент:

старший науковий співробітник  
відділу фізико – технічних проблем  
металургії сталі Інституту чорної металургії  
НАН України ім. З.І. Некрасова,  
кандидат технічних наук,  
старший науковий співробітник



Віталій ПШТЮК

Підпис к.т.н., с.н.с. Віталія Піптюка ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар Інституту чорної металургії  
НАН України ім.З.І.Некрасова  
доктор технічних наук,  
старший дослідник



Ганна КОНОНЕНКО