

## **ВИСНОВОК**

### **ПРО НАУКОВУ НОВИЗНУ, ТЕОРЕТИЧНЕ ТА ПРАКТИЧНЕ ЗНАЧЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ**

Аспірантки Арендач Наталі Анатоліївни на тему:

«Розробка технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю»,  
що подана на здобуття ступеня доктора філософії  
зі спеціальності 136 «Металургія»

Дисертаційна робота Арендач Наталі Анатоліївни на тему: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ ПРОДУВКИ В СТАЛЕРОЗЛИВНОМУ КОВШІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ» виконана у відділі фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, подана на здобуття ступеня доктора філософії зі спеціальності 136 «Металургія». Тема дисертації затверджена на засіданні вченої ради ІЧМ НАН України (протокол №5 від 19 вересня 2023 року), скоригована на засіданні вченої ради ІЧМ НАН України (протокол №12 від 19 грудня 2024 року),

#### **1. Ступінь актуальності теми дисертації та її зв'язок з планами наукових робіт**

В сучасних умовах сталь лишається одним з головних конструкційних матеріалів, при цьому особливе місце займає саме сортамент сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % мас. Зазначена особливість пов'язана, в першу чергу, з наявністю у них спеціальних механічних властивостей, зокрема підвищеної пластичності при деформації у холодному стані. Таким чином, при використанні у складі машин та агрегатів сталей низьковуглецевого сортаменту з вмістом вуглецю нижче 0,1 % мас. забезпечується висока

надійність та експлуатаційна міцність при зниженні загальної металоємкості устаткування.

Виробництво сталей зазначеного хімічного складу базується на окисленні надлишкового вмісту домішок за рахунок введення у розплав кисню у газоподібній або оксидній формі. При цьому технологічна ефективність (оцінена за показником виходу придатного) зазначеного процесу у значній мірі залежить від залишкового вмісту вуглецю у розплаві. При досягненні концентрації вуглецю в розплаві нижче 0,01 % спостерігається значне його переокислення, що відображається у зниженні виходу придатного рідкої сталі та забрудненні розплаву оксидними неметалевими включеннями.

Враховуючи фізико-хімічні особливості отримання сталей з вмістом вуглецю нижче 0,01 % їх виробництво потребує спеціального технологічного обладнання: кисневих конвертерів з додатковим введенням у ванну нейтрального газу, що забезпечує активізацію масообмінних процесів в системі «метал-шлак»; устаткування для вакуумування залізовуглецевих розплавів, що додатково дозволяє проводити окислення вуглецю у розплаві при зниженому тиску. На вітчизняних металургійних підприємствах зазначене металургійне устаткування практично не представлено, а його придбання та встановлення найближчим часом є практично неможливим через високу вартість.

Таким чином, в сучасних умовах вітчизняних сталеплавильних підприємств, актуальним завданням для металургійної науки є розробка альтернативних ефективних технічних рішень, що до виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,01%, що відповідають наявній матеріально-технічній базі з мінімальною модернізацією устаткування. Перспективним напрямом вирішення зазначеної задачі є здійснення зневуглецювання залізовуглецевого розплаву у дві стадій: видалення вуглецю з розплаву до критичної концентрації на етапі виплавки у плавильному агрегаті, а видалення вуглецю з розплаву нижче критичної концентрації пропонується

здійснювати за рахунок продувки ванни сумішшю «кисень-нейтральний газ» за межами сталеплавильного агрегату у агрегаті ківш-піч.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Робота є результатом закінченого циклу науково-дослідних робіт, що проводилися кафедрою металургії чавуну та сталі Українського державного університету науки та технологій (раніше - Національної металургійної академії України) НДР G060F10019 (автор дисертації був виконавцем зазначеної роботи) та відділу фізико-технічних проблем металургії сталі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України НДР 0124U001695 (автор дисертації приймав участь у виконанні всіх етапів зазначеної роботи відповідно до календарного плану на безоплатній основі).

## **2. Наукова новизна, теоретичне та практичне значення результатів дисертації**

### **Наукова новизна:**

- Отримали подальшого розвитку уявлення щодо перебігу окислювальних реакцій в багатокомпонентних залізовуглецевих сплавах за рахунок кисеньвмісної газової фази та тиску на процеси окислення вуглецю на етапі позапічної обробки сталі. Встановлено, що ймовірність протікання реакції розчинення кисню у розплаві та окислення вуглецю до CO на 19%відн. збільшується при збільшенні тиску у 34 рази за рахунок гідростатичного впливу шару металу та шлаку для сталерозливного ковша ємністю 250 т.

- За результатами фізичного моделювання при використанні методу тіньової зйомки вперше встановлено, що при взаємодії газових потоків, які витікають з однаковими газодинамічними характеристиками в порожнину камери змішування під кутом 25-40° до вертикальної вісі камери, відбувається повне їх змішування без втрати швидкості потоку суміші газів.

- Для промислових умов обробки сталі у ковші ємністю 250-т за результатами низькотемпературного моделювання (рідина, що імітує сталь -

вода), встановлено гідродинамічні особливості гомогенізації рідини в сталерозливному ковші при донній продувці сумішшю системи «кисень-нейтральний газ». Вперше встановлено, що за інтенсивності  $1\text{ м}^3/\text{т}\cdot\text{год}$  (за умов збільшення витрати продувного газу на 20% у порівнянні зі стандартною технологією) відбувається утворення тангенціальних потоків, які пульсують й залучають більшу частину ванни (~ на 52%) до перемішування—та ~ на 42% скорочується тривалість усереднення хімічного складу рідини при додаванні у якості імітатора добавки, що розчиняється хлориду натрію.

- За результатами лабораторного високотемпературного моделювання вперше встановлено, що за умов продувки металевого розплаву з вмістом вуглецю 0,3%мас. сумішшю системи «кисень-нейтральний газ» при вмісті кисню 20-30% спостерігається пріоритетне окислення вуглецю зі швидкістю 0,056 %мас/хв з досягненням його кінцевого вмісту 0,01% з мінімальним окисленням інших домішок у розплаві.

### **Практична значимість:**

- Встановлено, що раціональна форма бульбашкоутворювача донного продувного блоку містить ненаправлену пористість або щілинні отвори з відстанню між щілинами 1,0-1,5 мм, при цьому час гомогенізації металеві ванни скорочується на 42% у порівнянні з використанням каналної пористості.

- Розроблено авторську методику електрокондуктометричного дослідження стосовно перерозподілу домішок в об'ємі металеві ванни сталерозливного ковша, яка підвищує інформативність щодо ефективності впливу режиму перемішування ванни на розподіл домішок за об'ємом всієї ванни.

- Запропоновано конструкцію донного продувного блоку для продувки залізовуглецевого розплаву газовою сумішшю системи «кисень-нейтральний

газ», яка складається із бульбашко утворювача, камери для змішування газів та каналів для підведення газів.

• Розроблено рекомендації використання у промислових умовах технології донної продувки рідкого розплаву у сталерозливному ковші при позапічній обробці сумішшю газів системи «кисень-нейтральний газ» (вміст кисню 20-30%, загальна витрата газової суміші 0,25-0,29 м<sup>3</sup>/т-год), які забезпечують отримання сталі з вмістом вуглецю до 0,01%.

### **Особистий внесок здобувача.**

Автор брав безпосередню участь у виконанні розрахунково-аналітичних досліджень і в лабораторному фізичному холодному та високотемпературному моделюванні спільно з співробітниками кафедри металургії чавуну та сталі Українського державного університету науки та технологій та відділу фізико-технічних проблем металургії сталі ІЧМ НАНУ. Результати досліджень опубліковані у співавторстві з ними. Обробка результатів досліджень та їх узагальнення виконані автором самостійно.

У публікаціях автором особисто виконано наступне: (4, 6) - проведено розрахунково-аналітичне дослідження із залученням методів термодинаміки; (2, 3, 4, 5, 6) - поставлено завдання і розроблена методика проведення експериментів щодо різнопланового фізичного моделювання донної продувки розплаву в ковші, виконано обробку отриманих за результатами фізичного моделювання даних та зроблені висновки; (1) – обґрунтований варіант конструкції донного продувочного блоку, визначений перелік можливих промислових ефектів, (7-15) – проведено підготовку тез та доповіді для участі в конференціях.

### **Оцінка мови та стилю дисертації.**

Дисертація написана чіткою, лаконічною технічною мовою з вірним використанням спеціальної технічної металургійної термінології. Стиль

викладення матеріалів дослідження, наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечують легкість і доступність їх сприйняття.

### **3. Наукові публікації, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, та повнота опублікування результатів дисертації**

За результатами дисертації опубліковано 15 наукових праць: з них 5 статей у фахових виданнях, що відповідають переліку ДАК МОН України, 9 статей і тез доповідей науково-практичних конференцій, 1 патент України на корисну модель.

1. Патент України на корисну модель 126453. Опубл. 25.06.2018, Бюл. № 12.

Праці, які опубліковані у фахових виданнях України:

2. Молчанов Л.С., **Шеремета Н.А. (Арендач Н.А.)**, Синегін Є.В. Дослідження ефективності гомогенізації рідкої сталі при продувці через блоки різної конструкції. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6, С. 76 – 80.

<https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.10>

[https://nmetau.edu.ua/file/zh2018\\_6\\_s10.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh2018_6_s10.pdf)

3. Molchanov L., **Arendach N.**, Synehin Y. Study of the design of bottom blowing devices for oxidative blowing in teeming ladles. *Сучасні проблеми металургії*. 2021. № 24, С. 81-89

<https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.08>

4. Молчанов Л.С., Голуб Т.С., **Арендач Н.А.** Комплексне дослідження особливостей перебігу окиснення вуглецю в сталюковші при донному бульбашковому продуванні сумішшю газів системи «кисень — нейтральний газ». *Збірник наукових праць ДДТУ Технічні науки*. 2024. Вип..2. С. 19-28

<https://doi.org/10.31319/2519-2884.45.2024.2>

<http://sj.dstu.dp.ua/article/view/318225>

5. Молчанов Л.С., **Арендач Н.А.**, Голуб Т.С. Лабораторне дослідження особливості змішування газових струменів технологічних газів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. №38, С.222-231

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38>

6. Голуб Т.С., **Арендач Н.А.** Термодинамічне дослідження процесів окислення домішок розплаву Fe-C за рахунок взаємодії з бульбашкою системи «нейтральний газ - кисень». *Метал та лиття України*, 2024. Вип. 32. № 3-4. С. 50-61.

<https://doi.org/10.15407/steelcast2024.03-04.007>

Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. Молчанов Л.С., **Арендач Н.А.**, Синегін Є.В. Визначення впливу конструктивних параметрів донного продувального блоку на ефективність процесів гомогенізації розплаву. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні імені професора Михальова О.І.: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 17-19 березня, 2020р. 2020, С. 48-50

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/236/144>

8. **Арендач Н.А.**, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Напрями вдосконалення технології виробництва низько вуглецевих розплавів. Литво. Металургія-2020: Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 8-10 вересня 2020 р. 2020, С. 196-197

[https://ptima.nas.gov.ua/images/stories/Conf/lite.\\_metallurgiya.2020.pdf](https://ptima.nas.gov.ua/images/stories/Conf/lite._metallurgiya.2020.pdf)

9. Молчанов Л.С., Синегін Є.В., **Арендач Н.А.** Математичне моделювання фізико-хімічних процесів металургійного виробництва. Всеукраїнська науково-методична конференція «Проблеми математичного моделювання»: Матеріали всеукраїнської науково-методичної конференції. Кам'янське, 27 – 28 травня 2020 р. 2020, С. 14-15

[https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/material\\_konf\\_traven\\_%202020.pdf](https://www.dstu.dp.ua/uni/downloads/material_konf_traven_%202020.pdf)

10. **Arendach N.**, Molchanov L., Synehin Y., Mamuzić I. Carbon removal from steel by oxidation blowing in teeming ladle. 14th International symposium of Croatian metallurgical society materials and metallurgy SHMD – 2020. Šibenik, CROATIA, June 21 – 26, 2020, P. 433

<https://hrcak.srce.hr/file/344226>

11. Molchanov L., **Arendach N.**, Synehin Y. Study of metal homogenization in teeming ladles with use of various bottom blowing devices for oxidative blowing.

Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні, 16-18 березня 2021р., Дніпро. 2021, С. 41-44

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/648/525>

12. **Арендач Н.А.**, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Розробка режимів окислювальної продувки залізовуглецевих розплавів сумішшю інертний газ – кисень у сталерозливному ковші. Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія-2021», 18-20 травня 2021 р., Запоріжжя. 2021, С. 255-256

[https://nmetau.edu.ua/file/lite.\\_metallurgiya.\\_2021.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya._2021.pdf)

13. **Арендач Н.А.**, Молчанов Л.С. Аналіз ефективності видалення вуглецю з розплаву на різних етапах виробництва сталі. Всеукраїнська науково-технічна конференція «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ», 14-16 листопада 2023 р. Дніпро. 2023, С. 7

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2023-conferens>

<https://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2023/12/%D0%9D%D1%96%D0%9C2023-%D1%83%D0%BA%D1%80.-11.12.pdf>

14. Голуб Т.С., Молчанов Л.С., **Арендач Н.А.** Оцінка поведінки домішок при продувці металеві ванни сумішшю кисень – нейтральний газ через донний продувний блок. Всеукраїнська науково-технічна конференція «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ 2024» присвячена 85-річчю Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 19-20 листопада 2024 р., Дніпро. 2024, С. 15

<https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-conferens>



[https://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2024/11/%D0%9D%D1%96%D0%9C\\_2024\\_%D1%83%D0%BA%D1%80\\_final\\_ver.pdf](https://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2024/11/%D0%9D%D1%96%D0%9C_2024_%D1%83%D0%BA%D1%80_final_ver.pdf)

15. Голуб Т.С., Молчанов Л.С., **Арендач Н.А.** Процес окислення вуглецю при виробництві сталі за рахунок продувки сумішшю технологічних газів системи «кисень – нейтральний газ», як запорука ресурсозбереження. VIII Міжнародний конгрес «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища, Енергоощадність, Збалансоване природокористування»

16-18 жовтня 2024 року, Львів. 2024, С. 185

<https://doi.org/10.56287/8285-40-1>

[science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/oct/36233/stalyy-rozvytok-zakhyst-navkolyshnoho-seredovyshcha-enerhooshchadnist-20241.pdf](https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/oct/36233/stalyy-rozvytok-zakhyst-navkolyshnoho-seredovyshcha-enerhooshchadnist-20241.pdf)

**Апробація результатів роботи.** Матеріали роботи були повідомлені та обговорені на: Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні імені професора О.І. Михальова», 17-19 березня, 2020р., Дніпро; IX Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія-2020», 8-10 вересня 2020 р., Запоріжжя; Всеукраїнській науково-методичній конференції «Проблеми математичного моделювання», 27 – 28 травня 2020 р., Кам’янське; 14th International symposium of Croatian metallurgical society materials and metallurgy SHMD – 2020, Šibenik, CROATIA, June 21 – 26 2020; Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні – ITMM 2021», 16-18 березня 2021р., Дніпро; X Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія-2021», 18-20 травня 2021 р., Запоріжжя; Всеукраїнській науково-технічній конференції «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ 2023», 14-16 листопада 2023 р., Дніпро; Всеукраїнській науково-технічній конференції «НАУКА І МЕТАЛУРГІЯ 2024», присвяченій 85-річчю Інституту чорної металургії ім. З. І. Некрасова

НАН України, 19-20 листопада 2024 р., Дніпро; VIII Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: Захист навколишнього середовища, Енергоощадність, Збалансоване природокористування», 16-18 жовтня 2024 р., Львів.

#### **4. Дані про відсутність текстових запозичень та порушень академічної доброчесності**

При виконанні дисертації аспірантка Арендач Наталя Анатоліївна дотримувалася принципів академічної доброчесності, що підтверджено сервісом перевірки робіт на виявлення схожості текстів Unicheck. За результатами перевірки та аналізу матеріалів дисертації не було виявлено ознак академічного плагіату, самоплагіату, фабрикації, фальсифікації.

#### **ВИСНОВОК:**

Ознайомившись з дисертаційною роботою Арендач Наталі Анатоліївни на тему: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ ПРОДУВКИ В СТАЛЕРОЗЛИВНОМУ КОВШІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ» зі спеціальності 136 «Металургія» та науковими публікаціями, у яких висвітлено основні наукові результати, а також враховуючи результати апробації дисертаційної роботи, вважаємо, що:

1. Дисертаційна робота: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ ПРОДУВКИ В СТАЛЕРОЗЛИВНОМУ КОВШІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ» за актуальністю, науковою новизною, обґрунтованістю та практичною значимістю є закінченим фундаментальним дослідженням, яке відповідає ОНП «Металургія».

2. Дисертаційна робота: «РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАСАД ОКИСЛЮВАЛЬНОЇ ПРОДУВКИ В СТАЛЕРОЗЛИВНОМУ КОВШІ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ СТАЛІ З НИЗЬКИМ ВМІСТОМ ВУГЛЕЦЮ» відповідає вимогам 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 від 12 січня 2022р. №44 і рекомендується до разового захисту у спеціалізованій вченій раді.

Голова засідання,

к.т.н., старший науковий співробітник

відділу фізико-технічних проблем

металургії сталі

Тетяна ГОЛУБ

Учений секретар Інституту чорної металургії

ім. З.І. Некрасова НАН України

к.т.н.



Лариса ГАРМАШ