

## АНОТАЦІЯ

*Арендач Н.А.* Розробка технологічних засад окислювальної продувки в сталерозливному ковші при виробництві сталі з низьким вмістом вуглецю. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 136 – *Металургія*. – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, Дніпро, 2025.

У дисертаційній роботі представлено результати огляду джерел сучасної науково-технічної бази щодо ехнологічних аспектів виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1%. Встановлено, що технологій з виплавки сталей з вмістом вуглецю нижче 0,1 % у кисневих конвертерах з подачею нейтрального газу з низу, а основного кисню зверху, які використовуються на сучасних металургійних підприємствах, супроводжуються зниженням виходу придатного рідкої сталі у порівнянні з виробництвом сталей вуглецевого сортаменту. Що стосується технології газо-кисневого рафінування, то вона базується на подаванні технологічних газів з нижньої частини сталеплавильного агрегату, зокрема через дно для ГКР процесу та з бокової сторони ванни – для АОД. При цьому використовуються фурми спеціальної конструкції «труба у трубі», які забезпечують введення кисню у металеву ванну в оболонці з палива, виключаючи високотемпературний вплив зони окислення на футерівку. При цьому технологія газокисневого рафінування передбачає чергування продувки металеві ванни киснем та нейтральним газом, що забезпечує уникнення переокислення металу та відповідно забезпечення високого рівня виходу придатного рідкої сталі. Використання методів окислювальної продувки на етапі вакуумування сталі є найбільш ефективним методом зниження вмісту вуглецю нижче концентрації 0,1%. Це зумовлено саме значним впливом зовнішнього тиску на процеси окислення (моноксид вуглецю є газоподібною речовиною). Суттєвим недоліком процесів видалення вуглецю з металевого розплаву нижче 0,1 %, що базуються на процесах газо-кисневого рафінування, є використання спеціального

технологічного обладнання, встановлення якого потребує значних капіталовкладень. Що стосується процесів окислення вуглецю киснем при пониженому тиску, то вони масово не застосовуються через невелику стійкість вузлів підводу кисню у розплав. Підтверджена доцільність виділення двох етапів у процесі виробництва сталей з вмістом вуглецю менше 0,1%: видалення вуглецю з розплаву до рівня 0,2% у процесі виплавки; досягнення концентрації вуглецю нижче 0,1% за рахунок доведення металу на етапі позапічної обробки сталі.

Проведено термодинамічні розрахунки процесу окислення домішок залізовуглецевого розплаву за рахунок донної продувки кисеньвмістною газовою фазою, які дозволили встановити черговість та пріоритетність процесів окислення у металевій ванні й вплив на них надмірного тиску. Таким чином, підтверджена теоретична можливість ефективного видалення вуглецю на етапі позапічної обробки сталі за рахунок донної продувки кисеньвмістним газом у бульбашковому режимі.

Шляхом проведення комплексного дослідження, яке передбачало використання методів тіньової зйомки та низькотемпературного моделювання, була визначена раціональна конструкція донного продувального блоку для введення кисеньвмістної газової фази в об'єм металевого розплаву. Встановлено, що продувний блок розробленої конструкції повинен складатися: з каналів для підведення технологічних газів, камери-змішувача технологічних газів, бульбашкоутворювача для надання газовій фазі більшої поверхні контакту з металом. Щодо кожного з елементів продувального блоку встановлені раціональні параметри: найбільш ефективною конструкцією бульбашкоутворювача в складі донного пристрою для продування розплавів є використання матеріалів з неорієнтованою пористістю та щільною пористістю з шириною щілин 1-2 мм, використання яких дозволяє отримати стабільний стовп дрібних бульбашок, що скорочує час гомогенізації розплав; відповідно до емпірично отриманих результатів канали для ведення різних продувних газів в камеру повинні знаходитися під кутом до вертикальної вісі

в межах 25- 40°. Конструкція розробленого донного блоку для продувки металевого розплаву сумішшю технологічних газів у ковші захищена патентом України на корисну модель № 1226453 «Вогнетривкий блок для продувки металу газами».

Проведені дослідження на натурній холодній моделі сталерозливного ковша щодо розчинення «важких» присадок речовин при продуванні крізь донну фурму за бульбашковим режимом з метою встановлення особливостей масообмінних процесів. За їх результатами було встановлено, що під час продувки крізь блок з ненаправленою пористістю формується потік бульбашок, який не тільки підіймається вгору під дією сил Архімеда, але й створює додатковий рух середовища в прилеглих до потоку бульбашок шарах ванни; під час продувки у бульбашковому режимі найбільша зміна концентрації за час продувки відбувається в серединному об'ємі ванни ковша; найкращі умови перемішування ванни та найкоротший час її гомогенізації створюються при продуванні з інтенсивністю подачі продувального газу 0,684-1,026 м<sup>3</sup>/т·сталі год; найкращі умови щодо коливання рідкої ванни, які не повинні утворювати ділянки оголеного металу під час продувки, створюються при інтенсивності введення продувального газу 0,684-1,026 м<sup>3</sup>/т сталі·год; за відведений при виконанні досліджень час продувки заплановану концентрацію розчину 1% було досягнуто при інтенсивності введення у ванну газу 1,026 -1,368 м<sup>3</sup>/т·сталі год, при більш швидкому досягненні «гомогенного» стану рідкої ванни при інтенсивності подачі газу 1,026 м<sup>3</sup>/т·сталі год. Тобто рекомендацією для продування ванни у сталерозливному ковші крізь донний блок з ненаправленою пористістю у бульбашковому режимі для здійснення процесу зневуглицювання розплаву є продувка з інтенсивністю введення газу на рівні 0,36 м<sup>3</sup>/т сталі·год (при перерахуванні на реальний промисловий об'єкт – сталерозливний ківш ємністю 250т).

За результатами високотемпературного моделювання процесу продувки залізовуглецевого розплаву з невеликим вмістом вуглецю (0,3%мас) сумішшю кисень – нейтральний газ через одинарний продувний канал, що імітує

бульбашковий режим донної продувки, встановлено, що раціональним з точки зору окислення вуглецю та експлуатації продувних пристроїв є вміст у газовій суміші кисню 20-30%. При цьому процес окислення відбувається зі швидкістю 0,056%мас/хв і супроводжується пріоритетним окисленням вуглецю у багатокомпонентному залізовуглецевому розплаві.

**Ключові слова:** низьковуглецева сталь, донна продувка, газове бульбашкоутворення, донний продувний блок, позапічна обробка, сталь-ківш

## SUMMARY

**Arendach N.A.** Development of technological foundations of oxidizing melt purging in a ladle during the production of low-carbon steels. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the Doctor of Philosophy degree in specialty 136 – Metallurgy. – Iron and steel Institute of Z.I. Nekrasov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, 2025.

The dissertation presents the results of a review of the sources of the modern scientific and technical base regarding the technological aspects of the production of steels with a carbon content below 0.1%. It was established that technologies for steels smelting with a carbon content less than 0.1% in oxygen converters with the top oxygen supply and the bottom supply of neutral gas are used at modern metallurgical enterprises. However, they are accompanied with a decrease in the yield of liquid steel in comparison with the production of middle carbon steels. As for gas-oxygen refining technologies, they are based on the supply of process gases from the lower part of the steelmaking unit, in particular through the bottom for the GKR process and from the wall-side of the bath - for AOD. At the same time, nozzles of a special “pipe-in-pipe” design are used, which ensure the introduction of oxygen into the metal bath in the fuel shell, excluding the high-temperature influence of the oxidation zone on the lining. At the same time, the technology of gas-oxygen

refining involves alternating purging of the metal bath with oxygen and neutral gas, which ensures the avoidance of overoxidation of the metal and, accordingly, ensures a high level of yield of suitable liquid steel. The use of oxidation blowing methods at the steel vacuuming stage is the most effective method of reducing the carbon content below a concentration of 0.1%. This is due to the significant influence of external pressure on oxidation processes (carbon monoxide is a gaseous substance). A significant drawback of processes for removing carbon from metal melt below 0.1%, based on gas-oxygen refining processes, is the use of special technological equipment installation of which requires significant capital investment.

As for the processes of carbon oxidation with oxygen under reduced pressure, they are not widely used due to the low stability of the nodes supplying oxygen to the melt. The expediency of separating two stages in the production process of steels with a carbon content less than 0.1% has been confirmed: removal of carbon from the melt to the level of 0.2% in the smelting process; achieving a carbon concentration below 0.1 due to metal treatment at the stage of out-of-furnace steel processing.

Thermodynamic calculations of the oxidation process of iron-carbon melt impurities due to bottom purging with an oxygen-containing gas phase were carried out. That made it possible to establish the sequence and priority of oxidation processes in a metal bath and the effect of excessive pressure on them. Thus, the theoretical possibility of effective carbon removal at the stage of out-of-furnace steel processing due to bottom purging with oxygen-containing gas in the bubbling mode has been confirmed.

By conducting a complex study, which involved the use of shadow photography and low-temperature modeling, a rational design of the bottom purging unit for introducing an oxygen-containing gas phase into the volume of the metal melt was determined. It was established that the blowing unit of the developed design should consist of: channels for supplying process gases, a mixing chamber for process gases, the bubbler to give the gas phase a larger contact surface with the metal. Rational parameters were set for each element of the blowing block. The most

effective design of the bubble generator as part of the bottom device for blowing melts is the use of materials of non-oriented porosity and slotted porosity with a width of the slit 1-2 mm. Their use allows you to obtain a stable column of small bubbles, due to which shortens the homogenization time of the melt. According to the empirically obtained results, the channels for supply various purging gases into the chamber should be at an angle to the vertical axis within 25-40°. The design of the developed bottom block for blowing the metal melt with a mixture of process gases in the ladle was protected by Ukrainian patent for utility model No. 1226453 “Refractory block for blowing metal with gases”.

Studies were conducted on a full-scale cold model of a steel casting ladle regarding the dissolution of “heavy” additives during purging through the bottom nozzle in the bubbling mode in order to establish the characteristics of mass transfer processes. According to their results, it was established that during purging through a block with non-directed porosity, a stream of bubbles is formed, which not only rises up under the action of Archimedean forces, but also creates additional movement of the area in the layers of the bath adjacent to the stream of bubbles. During purging in bubble mode, the largest concentration change occurs in the middle of the ladle bath. The best conditions for the bath mixing and the shortest time for its homogenization are created during purging with the intensity of the gas supply of 0.684-1.026 m<sup>3</sup>/t·steel h. The best conditions for the oscillation of the liquid bath, which should not form areas of bare metal during purging, are created at the intensity of the purging gas supply of 0.684-1.026 m<sup>3</sup>/t of steel·h. During the purging time the planned solution concentration of 1% was achieved at the intensity of gas supply into the bath of 1.026 -1.368 m<sup>3</sup>/t· steel h, with a faster achievement of the “homogeneous” state of the liquid bath at the intensity of gas supply of 1.026 m<sup>3</sup>/t· steel hours. That is, the recommendation for purging the bath in a steel casting ladle through the bottom block with non-directional porosity in the bubble mode for the process of decarburization of the melt with the intensity of gas supply at the level of 0.36 m<sup>3</sup>/t of steel·h (when transferred to a real industrial object - steel casting ladle with a capacity of 250 tons).

According to the results of high-temperature modeling of the process of iron-carbon melt purging with a lower carbon content (0.3% by mass) with a mixture of oxygen and neutral gas through a single blowing channel (simulating the bubbling mode of bottom blowing), it was established that the rational from the point of view of carbon oxidation and the operation of purging devices is the oxygen content in the gas mixture is 20-30%. At the same time, the oxidation process occurs at a rate of 0.056 wt%/min and is accompanied by priority oxidation of carbon in the multicomponent iron-carbon melt.

**Key words:** low-carbon steel, purging process, bubble gas formation, bottom purging unit, out-of-furnace treatment, ladle

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ АРЕНДАЧ НАТАЛІ АНАТОЛІЇВНИ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертаційного дослідження:

### *Статті у наукових фахових виданнях:*

1. Молчанов Л.С., *Шеремета 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>

2. 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>

3. 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>

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

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

5. Молчанов Л.С., *Арендач Н.А.*, Голуб Т.С. Лабораторне дослідження особливості змішування газових струменів технологічних газів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2025. Вип. 39. С. 222-231

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

#### ***Патенти України на корисну модель:***

6. Вогнетривкий блок для продувки металу газами. Патент України на корисну модель № 126453 *Шеремета Н.А.*, Молчанов Л.С., Бойченко Б.М., Нізяєв К.Г., Стоянов О.М., Синегін Є.В., Лантух О.С., Цибулько В.С. МПК7 С21 С5/48, заявл. 26.12.2017, власник НМетАУ; опубл.25.06.2018, Бюл. № 12. 6с.

<https://ipro-pua.com/inv/pdf/d4hqohtu-pub-description.pdf>

#### ***Тези доповідей міжнародних науково-технічних та науково-практичних конференцій:***

7. Донний блок для продувки розплаву сумішшю технологічних газів різного складу / *Н.А. Шеремета*, Б.М. Бойченко, К.Г. Нізяєв, О.М. Стоянов, Л.С. Молчанов, Є.В. Синегін // *Литьє. Металлургия-2018: Материалы VII Международной научно-практической конференции*. Запорожье, 22-24 мая 2018 г.– Запорожье, 2018. – С. 324-325.

[https://nmetau.edu.ua/file/litvo\\_metallurgiya\\_2018.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/litvo_metallurgiya_2018.pdf)

8. *Арендач Н.А.*, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. Дослідження ефективності масообмінних процесів при продувці розплаву у сталерозливному ковші / *Тези доповідей всеукраїнська науково-технічна конференція «Наука і металургія»*



присвячена 80-річчю Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України. Дніпро, 9-10 жовтня 2019 р. – Дніпро, 2019. – С. 20.

[https://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2020/01/sc\\_and\\_met\\_2019.pdf](https://isi.gov.ua/wp-content/uploads/2020/01/sc_and_met_2019.pdf)

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

<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/itmm/article/view/237/146>

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

11. **N. Arendach**, L. Molchanov, Y. Synehin, I. Mamuzić Carbon removal from steel by oxidation blowing in teeming ladle / SHMD – 2020. – P. 433.

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

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

[https://nmetau.edu.ua/file/lite.\\_metallurgiya.2020.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/lite._metallurgiya.2020.pdf)

13. Various bottom blowing devices for oxidative blowing / L. Molchanov, **N. Arendach**, Y. Synehin // Міжнародна науково-технічна конференція

«Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні»: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Дніпро, 16 – 18 березня 2021 р. – Дніпро, 2021. – Інформаційні технології в металургії та: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції, 16-18 березня, 2021. – С. 41 - 44.

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

14. Розробка режимів окислювальної продувки залізовуглецевих розплавів сумішшю інертний газ – кисень у сталерозливному ковші / *Арендач Н.А.*, Молчанов Л.С., Синегін Є.В. // Литво. Металургія-2021: Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції. Запоріжжя, 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)

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

<https://crust.ust.edu.ua/server/api/core/bitstreams/6da1d195-ccc7-4fbf-9e89-d8f42fd1ca29/content>