

Л. С. Молчанов¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-6139-5956

Н. А. Арендач¹, аспірант, ORCID 0000-0002-0073-2362

Т. С. Голуб¹, к.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0001-9269-2953

¹ Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України

ЛАБОРАТОРНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЗМІШУВАННЯ ГАЗОВИХ СТРУМЕНІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ГАЗІВ

Анотація. Низьковуглецеві та ультра низьковуглецеві сталі є важливим конструкційним матеріалом для сучасної промисловості. Завдяки поєднанню унікальних властивостей легкості, міцності, легкості формування та зварювання з низькою деформацією вони здобули широкого використання як в машинобудівній галузі, так і при виробництві споживчих товарів. Виробництво такого типу сталей потребує складного процесу, бо видалення вуглецю із залізுவуглецевого розплаву нижче критичної концентрації має ряд складнощів. Перш за все вони пов'язані із особливостями перебігу реакцій між розсередженим у розплав вуглецем низької концентрації й киснем, який потрібно доставити до місця реакції. Це призводить до значного переокислення ванни за умов кисневого конвертування, й зумовлює актуальність пошуку альтернативних способів зниження вуглецю в розплаві. Тому перспективним напрямком є доведення залізுவуглецевого розплаву до низьких вмістів вуглецю у сталь-ковші після основного процесу виплавки з обробкою розплаву сумішшю газів, що містять кисень у невеликій кількості, через донні продувні блоки. Продувні гази, до потрапляння в розплав, необхідно рівномірно змішувати для здійснення раціонального поєднання як процесу перемішування за рахунок нейтральної складової, так й постачання окислювальної складової, яка представлена у невеликій кількості, до різних частин рідкої ванни. У зв'язку із цим було проведено стендове фізичне дослідження із використанням методів тіньової зйомки щодо розробки конструкції змішувальної камери для суміші газів, яка передуватиме донному продувному блоку. В статті наведено результати оцінювання особливостей змішування газів, які подавалися крізь однакові сопла, розташовані під різними кутами один до одного, при підтриманні однакової витрати газу на кожне із сопл. Було відмічено, що устаткування продувного блоку повинно бути оснащено камерою змішування відповідно до емпірично отриманих результатів із каналами для ведення різних продувних газів в камеру під кутом до вертикальної вісі в межах 25 - 40°, а камера – змішувач повинна мати відношення висоти до діаметру 1:1.

© Видавець Інститут чорної металургії ім. З. І. Некрасова НАН України, 2024



Ця стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

Ключові слова: сталь-ківш, низько вуглецева сталь, продувка через днище, суміш кисень-аргон, конструкція змішувача газів.

Посилання для цитування: Молчанов Л. С., Арендач Н. А., Голуб Т. С. Лабораторне дослідження особливості змішування газових струменів технологічних газів. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 222-231. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-222-231>.

Вступ. На сучасному етапі організації світового виробництва конкурентоспроможної альтернативи з доступним масовим виробництвом таким конструкційним матеріалам як чавун й сталь поки що не створено. При цьому значне розповсюдження мають саме низько вуглецеві сталі (з вмістом вуглецю до 0,3 %) [1, 2]. Особливе місце серед них займають сталі з вмістом вуглецю нижче 0,01 %. Вони відрізняються високими показниками пластичності у холодному стані, що робить їх дуже затребуваними при виробництві листового прокату, який застосовується у машинобудуванні, виробництві побутової техніки та у харчовій промисловості [3-5]. При цьому досягається значне зменшення металоємності продукції при збереженні службових властивостей.

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 супроводжується забрудненням 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 залізобуглецевих розплавів, яке дозволяє проводити окислення вуглецю у розплаві при зниженому тиску [6-8]. 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, актуальним завданням для металургійної науки є розробка альтернативних ефективних технічних рішень, щодо виробництва сталей з вмістом вуглецю нижче 0,01 % в

умовах матеріально-технічної бази вітчизняних металургійних підприємств з мінімальною модернізацією устаткування. Перспективним напрямом вирішення зазначеної задачі є здійснення зневуглецювання залізовуглецевого розплаву за рахунок продувки ванни сумішшю кисень-нейтральний газ, яка здійснюється за межами сталеплавильного агрегату на етапі позапічної обробки сталі. Зазначений етап виробництва рідкої сталі є важливою та невід'ємною ланкою виробничого ланцюга на більшості металургійних підприємств [9-10]. Тобто, виконання операції окислення вуглецю у сталях нижче критичної концентрації (менше 0,01 %) доцільно проводити у дві стадії: видалення вуглецю з розплаву до критичної концентрації на етапі виплавки у плавильному агрегаті та видалення вуглецю з розплаву нижче критичної концентрації (пропонується здійснювати на етапі позапічної обробки сталі за рахунок продувки розплаву сумішшю технологічних газів, які вміщують кисень). Загальна схема устаткування сталерозливного ковша для проведення продувки сталі у ковші сумішшю технологічних газів, що включає кисень на етапі позапічної обробки представлена на рис. 1.

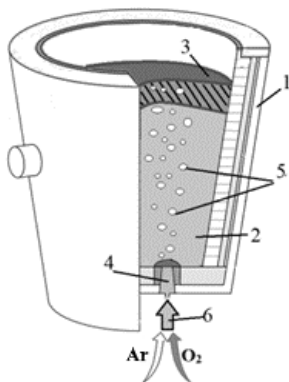


Рисунок 1 – Схематичне зображення сталерозливного ковша, який обладнано для рафінування сталі сумішшю технологічних газів: 1 – ківш стандартної конструкції; 2 – рідка сталь; 3 – шлаковий розплав; 4 – продувний донний блок, спеціальної конструкції; 5 – бульбашки, заповнені сумішшю технологічних газів, що включає кисень; 6 – змішувач продувних газів

Мета дослідження. На попередньому етапі досліджень, розрахунковим методом було запропоновано конструкцію донного продувного блоку для здійснення продувки металу на етапі позапічної обробки сумішшю технологічних газів, яка включає кисень. З метою уточнення величин кутів нахилу каналів, що забезпечують подачу продувних газів до камери змішування та встановлення режимів ефективного змішування потоків газу в порожнині донного продувного блоку було проведено стендове дослідження яке передбачало встановлення особливостей взаємодії газових струменів, які розташовані під певним кутом відносно один-одного.

Методика дослідження. Виходячи з наведеного вище для випадку здійснення операції окислення вуглецю в сталерозливному ковші за рахунок продувки сумішшю технологічних газів, яка вміщує кисень, удосконалення конструкції сталерозливного ковша полягає у посиленні футерівки шлакового поясу для забезпечення високого спротиву дії активних металургійних шлаків, що можуть містити певну кількість оксидів заліза та заміну стандартного блоку для донної продувки на спеціальний, який забезпечує можливість використання кисню [11, 12]. Пропонується використання донного продувального блоку, який дозволяє проводити продувку сумішшю декількох газів, ескіз якого представлений на рис. 2. Відповідно до теоретичних розрахунків, вогнетривкий блок для продувки металу газами, зазначеної конструкції, повинен складатися з газонепроникної матриці та розташованих у ній каналів. Два з них для підведення продувних газів повинні мати циліндричну форму. Їх розташування відповідно до розрахунків повинно бути під кутом 5-15° до поздовжньої вісі симетрії блока для здійснення перемішування у змішувальній камері. У верхній частині блоку розташований вздовж вертикальної вісі та орієнтований вершиною до центра блока змішування канал, конічної форми заповнений газопроникним вогнетривким матеріалом, який переходить у порожню камеру циліндричної форми діаметром, рівним діаметру нижньої основи конічного каналу – камеру змішування (співвідношення діаметру й висоти камери 1:1).

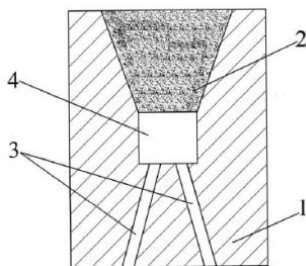


Рисунок 2 – Вогнетривкий блок для продувки металу газами: 1 – вогнетривкий газонепроникний матеріал; 2 – конічний канал, заповнений газопроникним вогнетривким матеріалом; 3 – циліндричні канали для підведення технологічних газів; 4 – камера-змішувач циліндричної форми

Вогнетривкий блок для продувки металу газами працює наступним чином: технологічний газ подається через циліндричні канали, що розташовані у газонепроникній вогнетривкій матриці, до порожнистої камери циліндричної форми. У порожнистій камері циліндричної форми технологічний газ перерозширюється і подається до нижньої основи конічного каналу, який розміщено у газонепроникній вогнетривкій матриці. За рахунок наявності у конічному каналі вогнетривкого газопроникного матеріалу технологічний газ поділяється на бульбашки, які, надходячи у розплав, інтенсивно перемішують його.

Застосування приведеного пристрою повинно забезпечувати ефективне перемішування рідкого металу у сталеплавильних агрегатах.

Дослідження базувалось на вивченні геометричних особливостей взаємодії газових струменів, що фіксувалися методом тіньової зйомки. Схема лабораторної установки представлена на рис. 3. Основною установкою слугували продувні сопла діаметром 0,5 мм, рухомо закріплені на горизонтальному штативі. Кожне сопло було приєднано через систему регулювання параметрів подачі газу до балону з газом метаном (для можливості якісної візуалізації струменя на тіньовій зйомці за рахунок значної різниці щільностей газу, що витікає з сопла та навколишнього середовища). Продувку здійснювали з однаковою витратою для кожного з потоків газів. Освітлення моделі здійснювали твердотільним джерелом світла для створення лінійного потоку світу й меншого спалювання зображення на білому екрані. Завдяки рухомій основі сопла поступово нахилили під різними однаковими для кожного із сопел кутами до вертикалі й фіксували за допомогою відеокамери результат взаємодії струменів газу, який витікав з них. Були досліджені кути нахилу сопел до вертикальної осі від 0° (рух потоків на зустріч один одному) до 180° (повністю протилежний рух потоків).

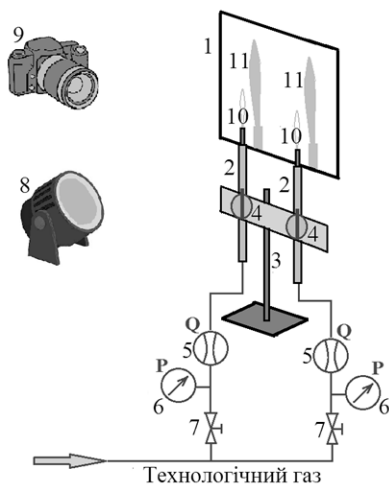


Рисунок 3 – Функціональна схема установки для дослідження особливостей взаємодії газових потоків методом тіньової зйомки: 1 – білий екран, 2 – продувні сопла діаметром 0,5 мм, 3 – штатив, 4 – механізм регулювання кута нахилу продувного сопла відносно вертикальної осі, 5 – ротаметр, 6 – манометр, 7 – кран, 8 – твердотільний освітлювальний пристрій, 9 – відеокамера

Результати досліджень. Найбільш характерні результати дослідження представлені на рис.4. Відповідно до даних, встановлено, що струмені, сформовані однаковими початковими умовами (витрата та тиск газу) можуть взаємодіяти шляхом або змішування (рис. 4 позиції 1 – 5), або повного взаємного пригнічення (рис. 4 позиція 9).

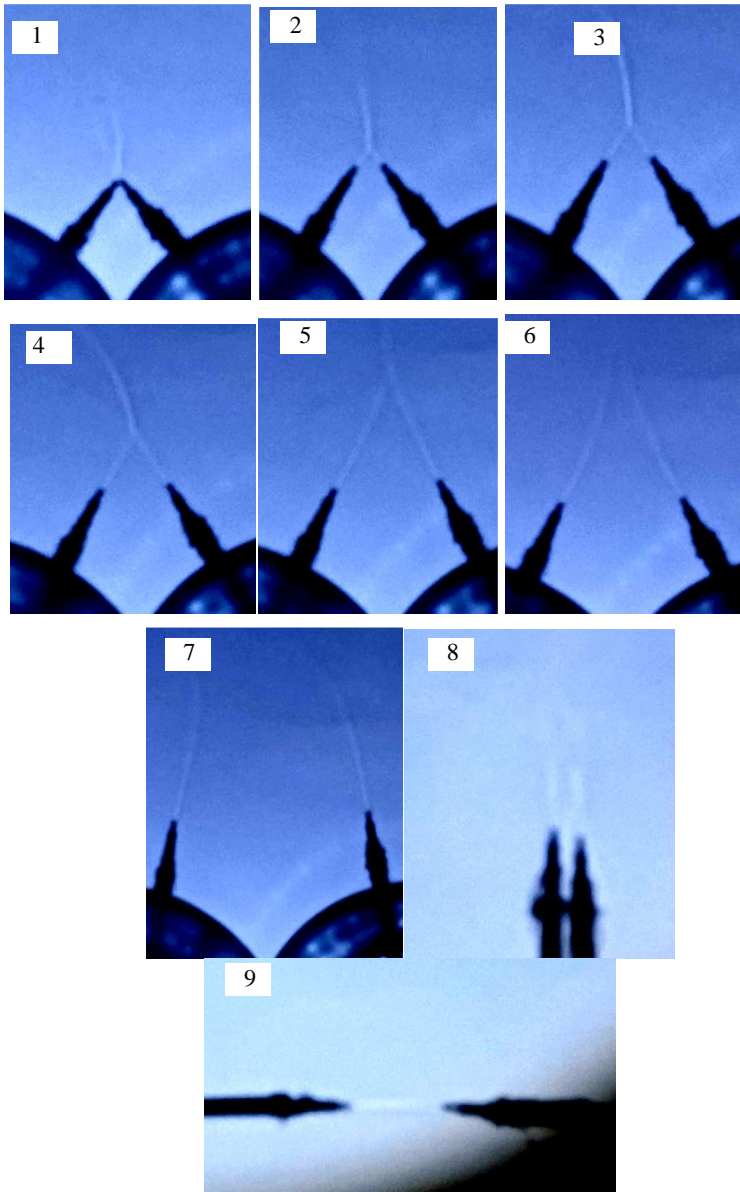


Рисунок 4 – Характерні фото дослідження особливостей взаємодії газових струменів при різному куті відхилення сопел від вертикальної вісі: 1 – 45°, 2 -40°; 3- 35°; 4 – 30°; 5 – 25°; 6-20°; 7-15°; 8-0°; 9-90°

При цьому ефективно змішування спостерігається при куті нахилу сопла до вертикальної вісі в проміжку $25 - 40^\circ$ (рис. 4 позиції 2 - 5). Повнота змішування була встановлена враховуючи, що тіньова зйомка дозволяє встановити нерівномірність газового середовища за щільністю, що буде відповідати змінам кольору ділянок на результуючому струмені у більш світлий чи більш темний бік за освітленням при різному змішуванні газів. На знімках 3 - 4 (рис. 4) таких ділянок із різним кольором результуючого струменя не встановлено, тому можна зробити висновок про повне змішування потоку, на відміну від фото. 9 (рис. 4), де відбувається дія потоків на зустріч один одному із взаємним пригніченням. Це призводить до втрати газовими струменями векторів спрямованості та розпорошенню газових струменів у навколишнє середовище. Зазначений режим забезпечує повне змішування двох потоків проте є неприпустимим для умов витікання газових струменів з різною швидкістю (різною витратою та тиском). Також за довжиною результуючого струменя можна сказати що найменші втрати швидкості потоку були отримані при куті змішування $30-35^\circ$ (фото 3,4 рис. 4 – найдовші результуючі потоки).

Висновки

В ході проведення стендових досліджень встановлено, що устаткування сучасного сталерозливного ковша може бути використано для проведення операції зневуглицювання розплаву за рахунок продувки крізь донні продувні блоки сумішшю технологічних газів, що містить кисень із конструкційним вдосконаленням донного продувного блоку, який повинен мати систему попереднього змішування технологічних газів. Відповідно до емпірично отриманих результатів канали для введення різних продувних газів в камеру повинні знаходитися під кутом до вертикальної вісі в межах $25- 40^\circ$, а камера – змішувач повинна мати відношення висоти до діаметру 1:1.

Перелік посилань

1. Singh R. 6 - Classification of steels. Applied Welding Engineering (Third Edition). Processes, Codes, and Standardsю 2020. P. 53 – 60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821348-3.00014-8>
2. Islam T., Rashed H. M. M. A. Classification and application of plain carbon steels. Reference Module in Materials Science and Materials Engineeringю 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10268-1>
3. Shibata K., Asakura K. Transformation behavior and microstructures in ultra-low carbon steels. *ISIJ International*ю 1995. Vol. 35(8). P. 982 – 991 <https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.982>
4. Liu, Z., Li, W., Shao, X. et al. An ultra-low-carbon steel with outstanding fish-scaling resistance and cold formability for enameling applications. *Metall. Mater. Trans. Aю* 2019. Vol. 50. P. 1805 – 1815. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-05101->

z

5. Storozheva L. M. Ultralow carbon steels for the automotive industry with the effect of hardening due to drying of finished parts. *Metal Science and Heat Treatment*. 2001. Vol. 43. P. 336 – 344. <https://doi.org/10.1023/A:1013632315470>

6. Neves L., Oliveira H. P. O., Tavares R. Evaluation of the effects of gas injection in the vacuum chamber of a RH degasser on melt circulation and decarburization rates. *ISIJ International*. 2009. Vol. 49. Iss. 8. P. 1141 – 1149. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1141>

7. Liu J., Harris R. Decarburization of steel to ultra-low-carbon levels by vacuum levitation. *ISIJ International*. 1999. Vol. 39. Iss. 1. P. 99 – 101. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.101>

8. Sano M., Yetao H., Kato M., Sakamoto S. Decarburization reaction of molten iron of low carbon concentration with vacuum suction degassing method. *ISIJ International*. 1994. Vol. 34. Iss. 8. P. 657 – 662. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.649>

9. Смирнов А. Н., Зборщик А. М. Внепечное рафинирование чугуна и стали. Донецк : Изд-во «Ноулидж», 2012. 179 с.

10. Дюдюкин Д. А., Бать С. Ю., Гринберг С. Е., Маринцев С.Н. Производство стали на агрегате ковш-печь. Донецк : ООО Юго – Восток, 2003. 300 с.

11. Molchanov L., Arendach N., Synehin Y. Study of the designs 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>.

12. Молчанов Л. С., Шеремета Н. А., Синегін С. В. Дослідження ефективності гомогенізації рідкої сталі при продувці через блоки різної конструкції. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 76 – 80. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tipm_2018_6_12.

References

1. Singh, R. (2020). 6 - Classification of steels. Applied Welding Engineering (Third Edition). *Processes, Codes, and Standards*, pp. 53–60. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821348-3.00014-8>

2. Islam, T., & Rashed, H. M. M. A. (2019). Classification and application of plain carbon steels. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.10268-1>

3. Shibata, K., & Asakura, K. (1995). Transformation behavior and microstructures in ultra-low carbon steels. *ISIJ International*, 35(8), 982–991. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.982>

4. Liu, Z., Li, W., Shao, X. et al. (2019). An ultra-low-carbon steel with outstanding fish-scaling resistance and cold formability for enameling applications. *Metall. Mater. Trans. A.*, 50, 1805–1815. <https://doi.org/10.1007/s11661-018-05101-z>

5. Storozheva, L. M. (2001). Ultralow carbon steels for the automotive industry with the effect of hardening due to drying of finished parts. *Metal Science and Heat Treatment*, 43, 336–344. <https://doi.org/10.1023/A:1013632315470>

6. Neves, L., Oliveira, H. P. O., & Tavares, R. (2009). Evaluation of the effects of gas injection in the vacuum chamber of a RH degasser on melt circulation and decarburization rates. *ISIJ International*. vol. 49. iss. 8. P. 1141 – 1149. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.1141>

7. Liu, J., & Harris, R. (1999). Decarburization of steel to ultra-low-carbon levels by vacuum levitation. *ISIJ International*, 39 (1), 99–101. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.39.101>
8. Sano, M., Yetao, H., Kato, M., & Sakamoto, S. (1994). Decarburization reaction of molten iron of low carbon concentration with vacuum suction degassing method. *ISIJ International*, 34(8), 657–662. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.34.649>
9. Smirnov, A. N., & Zborshik, A. M. (2012). *Vnepechnoe rafinirovanie chuguna i stali*. Nowelwidge
10. Dudkin, D. A., Bat, S. Yu., Grinberg, S. Ye., & Marintsev, S. N. (2003). *Proizvodstvo stali na aggregate kovsh-pech*. Ugo – Vostok
11. Molchanov, L., Arendach, N., & Synehin, Y. (2021). Study of the designs of bottom blowing devices for oxidative blowing in teeming ladles. *Modern problems of metallurgy*, 24, 81 – 89. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.2021.01.08>
12. Molchanov, L., Sheremeta, N., & Synehin, Y. (2018). Doslidzennia efektyvnosti gomogenizacii ridkoj stali pry produvcu cherez bloku riznoj konstrukcii. *Theory and practice of metallurgy*, 6, 76–80. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Tipm_2018_6_12

L. S. Molchanov¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-6139-5956

N. A. Arendach¹, Ph. D. Student, ORCID 0000-0002-0073-2362

T. S. Golub¹, Ph. D. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0001-9269-2953

¹ *Iron and Steel Institute of Z. I. Nekrasov National Academy of Sciences of Ukraine*

LABORATORY STUDY OF THE MIXING CHARACTERISTICS OF GAS JETS OF PROCESS GASES

Abstract. Low-carbon and ultra-low-carbon steels are important structural material for modern industry. Due to the combination of unique properties of lightness, strength, ease of forming and welding with low deformation, they have gained widespread use both in the engineering industry and in the production of consumer goods. The production of this type of steel requires a complex process, because the removal of carbon from the iron-carbon melt below the critical concentration has a number of difficulties. First of all, they are related to the peculiarities of the course of reactions between low-concentration carbon dispersed in the melt and oxygen, which must be delivered to the reaction site. This leads to a significant overoxidation of the bath under the conditions of oxygen converter process, and determines the urgency of the search for alternative ways of reducing carbon in the melt. Therefore, a promising direction is to bring iron-carbon melt to low carbon content in steel ladles after the main smelting process with treatment of the melt with a mixture of gases containing a small amount of oxygen through bottom blowing blocks. Blowing gases, before entering the melt, must be evenly mixed to implement a rational combination of both the mixing process due to the neutral component and the supply of the oxidizing component, which is present in a small amount, to different parts of the liquid bath. In this regard, a bench physical study was conducted using shadow imaging methods

for the design of a mixing chamber for a mixture of gases, that will precede the bottom purging block. The article presents the results of evaluating the characteristics of the mixing of gases that were fed through the same nozzles, located at different angles to each other, while maintaining the same gas consumption for each of the nozzles. It was noted that the purging unit equipment should be equipped with a mixing chamber according to empirically obtained results with channels for leading various purging gases into the chamber at an angle to the vertical axis within 25 - 40°, and the mixing chamber should have a ratio of height to diameter of 1:1.

Key words: steel bucket; low carbon steel; purging through the bottom; oxygen-argon mixture; gas mixer design.

For citation: Molchanov, L. S., Arendach, N. A., & Golub, T. S. (2024). Laboratory study of the mixing characteristics of gas jets of process gases. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 38, 222-231. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2024-38-222-231>

*Стаття надійшла до редакції збірника 07.10.2024 р.
Рекомендовано до друку редколегією збірника (Протокол № 12 від 19.12.2024 р.)*