



УДК 669.1

DOI 10.17073/0368-0797-2026-2-143-148



Оригинальная статья

Original article

ДОСТИЖЕНИЕ УЛЬТРАНИЗКОГО СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ВАКУУМАТОРЕ

К. Н. Плешивцев¹, А. А. Метелкин^{2,3}, О. Ю. Шешуков^{3,4},
А. Н. Роговский¹, Д. К. Егизарьян^{3,4}, А. В. Корюков²

¹ Липецкий государственный технический университет (Россия, 398050, Липецк, ул. Интернациональная, 5а)

² ПАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат» (Россия, 622025, Свердловская область, Нижний Тагил, ул. Металлургов, 1)

³ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

⁴ Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН (Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

✉ pleshitsev.konstantin@yandex.ru

Аннотация. Получение сверхнизкого содержания углерода в стали на уровне менее 0,002 % является критически важной задачей современной металлургии, определяющей качество таких высокотехнологичных продуктов, как электротехнические, суперферритные и аустенитные нержавеющие стали. В представленном исследовании проведен углубленный комплексный анализ кинетики и механизмов декарбонизации металлического расплава в условиях циркуляционного вакуумного агрегата (ЦВА/RH-процесс). Детально изучены пять конкурирующих процессов: десорбция газов с поверхности расплава, гомогенное образование пузырьков оксида углерода {CO} в объеме металла, гетерогенное формирование пузырьков на поверхности футеровки, диффузия инертного газа-носителя в пузырьки и интенсивное взаимодействие металлических брызг с вакуумной средой. Доминирующим механизмом удаления углерода является гомогенное образование пузырьков {CO} в глубине расплава, эффективность которого в 25 раз превышает эффективность формирования пузырьков на футеровке. Микроструктурный и рентгеноспектральный анализы подтвердили, что в нераскисленном металле присутствуют неметаллические включения (размером 5 – 140 мкм), которые могут служить активными центрами зарождения пузырьков {CO}. На основе промышленных испытаний предложена оптимизация технологических параметров: снижение расхода инертного газа до 80 м³/ч для увеличения поверхности контакта фаз и времени пребывания пузырьков в расплаве, строгое соблюдение времени выдержки перед разливкой в интервале 20 – 30 мин, а также обязательное применение безуглеродной футеровки в сталеразливочном ковше для минимизации вторичного науглероживания. Комплексное применение этих мер позволяет стабильно достигать целевого содержания углерода менее 0,002 %, что подтверждено промышленной практикой.

Ключевые слова: циркуляционный вакууматор, ультранизкое содержание углерода, декарбонизация, пузырьки, футеровка, кислород, сталь

Для цитирования: Плешивцев К.Н., Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Роговский А.Н., Егизарьян Д.К., Корюков А.В. Достижение ультранизкого содержания углерода при обработке металла в циркуляционном вакууматоре. *Известия вузов. Черная металлургия*. 2026;69(2):143–148. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-143-148>

* По материалам XVIII Международного Конгресса сталеплавыльщиков (г. Санкт-Петербург).

OBTAINING ULTRA-LOW CARBON CONTENT IN METAL PROCESSING USING A CIRCULATION VACUUM DEGASSER

K. N. Pleshivtsev¹✉, A. A. Metelkin^{2,3}, O. Yu. Sheshukov^{3,4},
A. N. Rogotovskii¹, D. K. Egiazaryan^{3,4}, A. V. Koryukov²

¹ Lipetsk State Technical University (5a Internatsional'naya Str., Lipetsk 398050, Russian Federation)

² JSC EVRAZ NTMK (1 Metallurgov Str., Nizhny Tagil, Sverdlovsk Region 622025, Russian Federation)

³ Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

⁴ Votolin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (101 Amundsena Str., Yekaterinburg 620016, Russian Federation)

✉ pleshivtsev.konstantin@yandex.ru

Abstract. Obtaining an ultra-low carbon content in steel at a level of less than 0.002 % is a critically important task of modern metallurgy, which determines the quality of such high-tech products as electrical, superferritic and austenitic stainless steels. In the presented study, an in-depth comprehensive analysis of the kinetics and mechanisms of decarburization of a metallic melt under conditions of a circulating vacuum unit (CVA/RH process) was carried out. Five competing processes were studied in detail: desorption of gases from the melt surface, homogeneous formation of carbon monoxide bubbles in metal volume, heterogeneous formation of bubbles on lining surface, diffusion of an inert carrier gas into bubbles, and intense interaction of metal sprays with a vacuum medium. The dominant mechanism of carbon removal is the homogeneous formation of {CO} bubbles in the melt depth, the efficiency of which is 25 times higher than the efficiency of bubble formation on the lining. Microstructural and X-ray spectral analyses confirmed that nonmetallic inclusions (5 – 140 μm in size) are present in the non-deoxidized metal, which can serve as active centers of {CO} bubble nucleation. Based on the industrial tests, optimization of technological parameters was proposed: reduction of the inert gas flow rate to 80 m³/h to increase the contact surface of the phases and the residence time of bubbles in the melt, strict observance of the holding time before casting in the range of 20 – 30 min, as well as the mandatory use of carbon-free lining in the steel ladle to minimize secondary carburization. The integrated application of these measures makes it possible to consistently achieve a target carbon content of less than 0.002 %, which is confirmed by industrial practice.

Keywords: circulation vacuum degasser, ultra-low carbon, decarburization, {CO} bubbles, refractory lining, oxygen, steel

For citation: Pleshivtsev K.N., Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Rogotovskii A.N., Egiazaryan D.K., Koryukov A.V. Obtaining ultra-low carbon content in metal processing using a circulation vacuum degasser. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2026;69(2):143–148.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2026-2-143-148>

* Based on the Materials of the 18th International Congress of Steelmakers (Saint Petersburg).

ВВЕДЕНИЕ

Современные требования к качеству стали, особенно для электротехнических и специальных марок, обуславливают необходимость снижения содержания углерода до ультранизких значений (<0,002 %). В циркуляционных вакууматорах этот процесс осложняется множеством взаимосвязанных факторов, включая кинетику реакций, гидродинамику расплава, свойства футеровки [1 – 5].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились на промышленных установках RH-процесса, при этом использовались:

- микроструктурный анализ проб металла;
- рентгеноспектральный микроанализ включений;
- теоретические расчеты площадей взаимодействия фаз;
- промышленные испытания с варьированием параметров [6].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе проанализированы следующие механизмы удаления углерода при пониженном давлении в циркуляционном вакууматоре (указаны на рис. 1) [1 – 3; 7; 8]:

- 1 – переход газов с поверхности расплава;
- 2 – образование пузырьков газа в глубине расплава;
- 3 – формирование пузырьков газа на поверхности футеровки;
- 4 – диффузия нейтрального газа, подаваемого через впускной патрубок, в пузырьки;
- 5 – взаимодействие металлических брызг с окружающей средой в вакуум-камере.

Механизмы 1, 4 и 5 функционируют в диффузионном режиме и зависят от площади взаимодействия расплава с газовой средой, а механизмы 3 и 4 зависят от количества образующихся пузырьков газа {CO} [9; 10].

Теоретические расчеты показали, что площадь взаимодействия по механизмам 4, 1 и 5 составляет 60, 6 и 1 м² соответственно. Таким образом, основным меха-

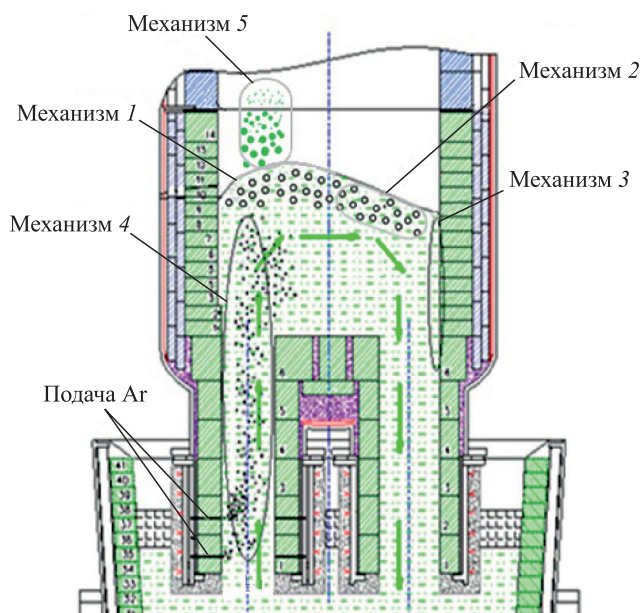


Рис. 1. Механизмы удаления газов в циркуляционном вакууматоре

Fig. 1. Gas removal mechanisms in a circulation vacuum degasser

низмом удаления углерода в диффузионном режиме через образование газа $\{CO\}$ является механизм 4.

Скорость удаления углерода из расплава по механизмам 2 и 3 зависит от концентраций кислорода и углерода в металле, от площади контакта футеровки с расплавом (механизм 3) и от объема обрабатываемого металла (механизм 2). Теоретические расчеты показывают, что при одинаковых технологических параметрах обработки расплава механизм 2 оказывается в 25 раз более эффективным, чем механизм 3.

Однако для объективной оценки удаления углерода через образование пузырьков газа $\{CO\}$ (механизм 2) необходимо рассмотреть условия и возможность их формирования [8; 11]. Образование пузырьков газа в глубине расплава возможно при наличии различных микронеоднородностей или на поверхности микро-частиц в расплаве. Для определения наличия микро-частиц в расплаве была отобрана проба металла

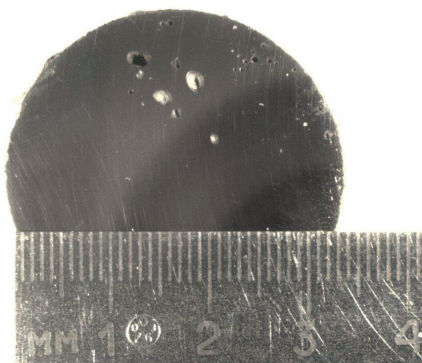


Рис. 2. Образец для исследования неметаллических включений

Fig. 2. Sample for investigation of non-metallic inclusions

с «повалки» конвертера во время измерения температуры, перед операцией раскисления/легирования. Для этого использовался погружной пробоотборник, из которого предварительно был извлечен раскисляющий элемент. После отшлифовки исследуемого образца был проведен микроструктурный анализ на наличие в нем неметаллических включений, показанных на рис. 2 [5].

По результатам исследований выявлено наличие неметаллических включений различных размеров: от 5 до 140 мкм (рис. 3) [5]. Дополнительно, на сканирующем электронном микроскопе Quanta Inspect S200 с системой Trident – XM4 был определен количественный элементный состав исследуемых неметаллических включений в пробе образца методом рентгеновского микроанализа. Полученные результаты представлены на рис. 4 [5].

Из представленных на рис. 3 и 4 данных видно, что состав неметаллических включений соответствует составу шлака, образующегося в конвертере, то есть даже в нераскисленном металле (перед обработкой в вакуумной камере) присутствуют неметаллические включения, которые могут служить основой для формирования пузырьков газа $\{CO\}$.

Таким образом установлено, что основными механизмами удаления углерода в циркуляционном

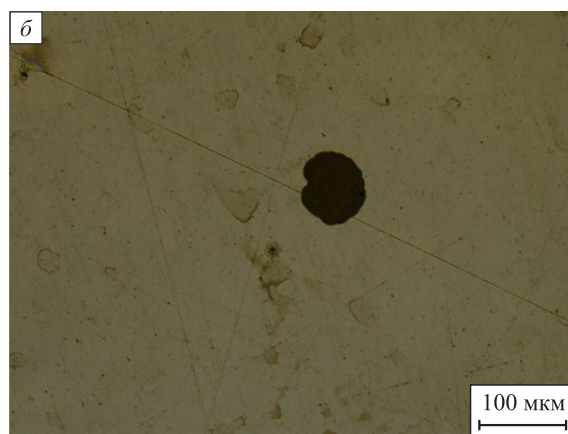
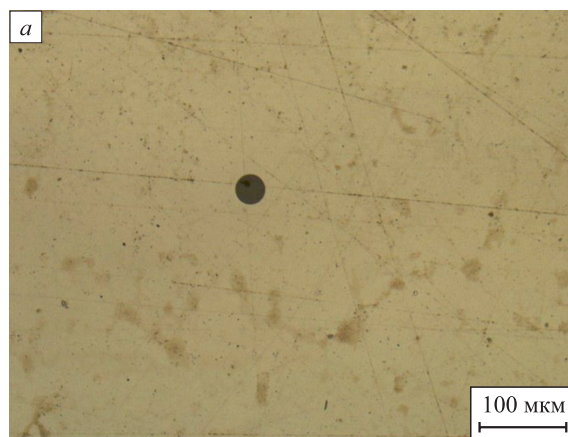


Рис. 3. Вид неметаллических включений

Fig. 3. View of nonmetallic inclusions

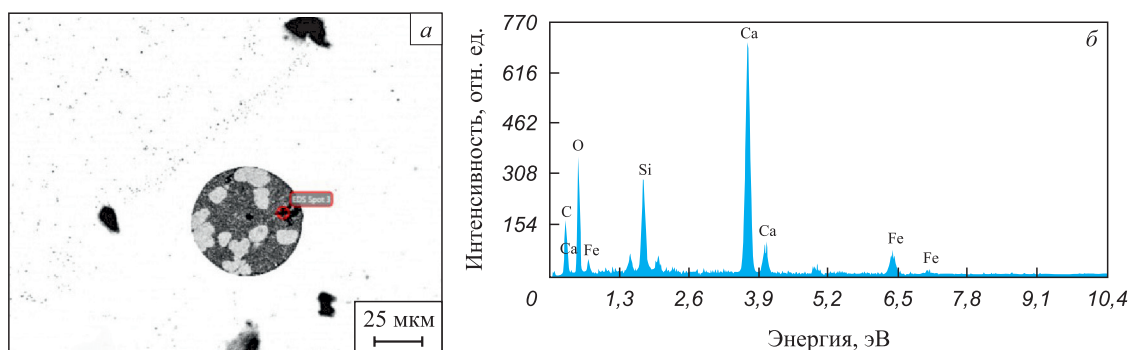


Рис. 4. Проба и состав неметаллического включения

Fig. 4. Composition of a non-metallic inclusion

вакууматоре являются образование пузырьков газа СО в расплаве (механизм 2) [12 – 14] и диффузионный режим (механизм 4) [15; 16].

При рассмотрении процесса удаления углерода из металла необходимо учитывать поступление данного элемента из футеровки. Для достижения ультранизкого содержания углерода в стали (менее 0,002 %) целесообразно усиливать механизмы дегазации и уменьшать поступление углерода из огнеупорных материалов.

Интенсифицировать механизм удаления углерода 2 (образование пузырьков газа {CO} в глубине расплава) можно за счет увеличения количества неоднородностей в расплаве, что достигается путем предварительного раскисления переокисленного металла алюминием перед вакуумированием. Например, на одном из заводов разрешена операция раскисления с использованием алюминия для достижения концентрации кислорода 400 ppm перед декарбонизацией в циркуляционном вакууматоре. Оптимальные значения концентрации углерода и кислорода в расплаве перед вакуумированием, согласно теоретическим расчетам, составляют: [C] = 0,043 %, т. е. [O] = 576,87 ppm.

Рациональный расход газа во впускном патрубке циркуляционного вакууматора зависит от состояния футеровки. В вакуум-камерах (140 – 170 т) для интенсификации процессов декарбонизации подают большое количество газа, что может привести к увеличению размеров пузырьков и к снижению эффективности декарбонизации [17 – 19].

Например, на одном из металлургических комбинатов был разработан режим глубокого обезуглероживания расплава на RH-вакууматоре, где для увеличения поверхности контакта металл – газовая фаза была снижена интенсивность подачи транспортирующего газа с 140 до 80 м³/ч, что позволило достичь содержания углерода 0,003 % и менее в готовой стали [7].

Еще одним фактором, влияющим на содержание углерода, является время выдержки металла перед разливкой. Оптимальное время перед разливкой составляет 20 – 30 мин, учитывая все операции (такие как крановые работы, отбор проб, замеры и др.). Увели-

чение этого времени может привести к повышению содержания углерода, в то время как более короткий срок выдержки может вызывать нестабильные параметры в процессе разливки металла на МНЛЗ, что проиллюстрировано на рис. 5.

На содержание углерода влияют и другие факторы: работоспособность эжекторов и степень их износа. Регулярные осмотры эжекторов и оценка их состояния необходимы, так как это напрямую влияет на способность системы достигать низкого давления. На практике было замечено, что чем быстрее удастся достичь давления ниже 100 Па, тем выше вероятности эффективного удаления углерода и достижения содержания углерода в стали менее 0,002 %.

Немаловажным фактором является чистота системы отходящих газов. Наличие загрязнений в виде шлако-металлических образований в системе газохода, в частности, в колене газохода, мешает достижению низкого давления в системе и, как следствие, затрудняет удаление углерода (рис. 6).

На содержание конечного углерода может повлиять футеровка [18; 20]. При этом остаточное содержа-

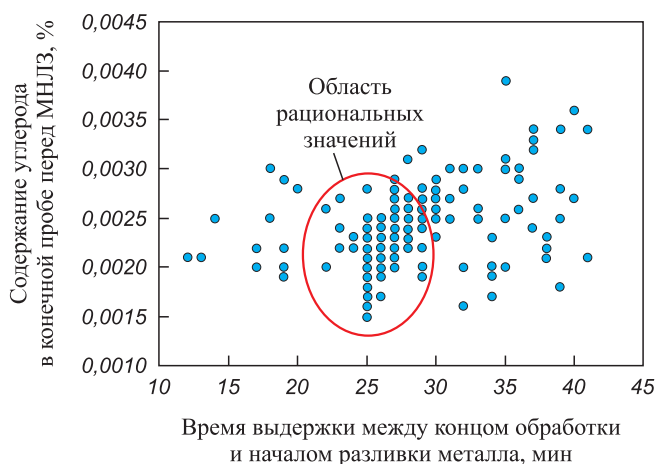


Рис. 5. Зависимость конечного содержания углерода от времени выдержки металла перед разливкой

Fig. 5. Final carbon content vs metal holding time before casting

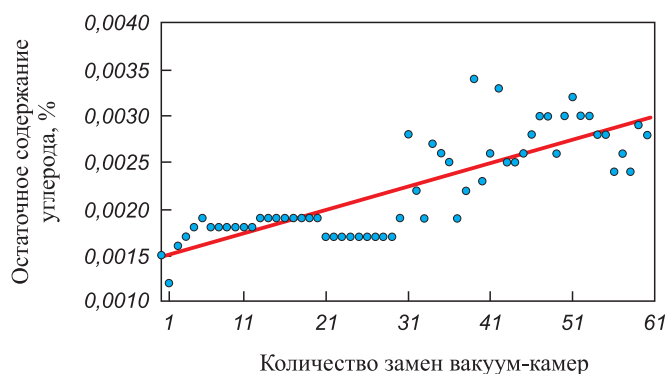


Рис. 6. Изменение содержания углерода в металле с течением времени после ремонта/очистки газохода

Fig. 6. Change in carbon content over the time after repair/cleaning of gas duct

ние углерода будет зависеть от объема растворяемого углерода из футеровки сталеразливочного ковша. Исследования показали, что замена углеродсодержащих огнеупорных материалов на безуглеродные или низкоуглеродные в области днища и нижней части стенок ковша существенно (на 60 %) снижает общую скорость растворения углерода из футеровки [7].

Выводы

Основными механизмами декарбонизации металла в циркуляционном вакууматоре являются образование пузырьков $\{CO\}$ в объеме расплава и продувка инертным газом. Ключевые технологические параметры: расход газа 80 м³/ч, время выдержки 20 – 30 мин.

Использование безуглеродной футеровки существенно снижает поступление углерода в расплав.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии / Пер. с нем. Москва: Металлургия; 1984:414.
2. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Термодинамические и кинетические закономерности / Пер. с нем. Москва: Металлургия; 1973:312.
3. Современная сталь: теория и технология: учебное пособие / О.Ю. Шешуков, И.В. Некрасов, А.А. Метелкин, Е.Ю. Лозовая, О.И. Шевченко, М.В. Савельев. Нижний Тагил: Нижнетагильский технологический институт (филиал) УрФУ; 2020:400.
4. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. Магнитогорск: МГТУ; 2000:544.
5. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Пleshivtsev К.Н., Кoryukov A.B., Александровская Д.Е. Определение основных механизмов декарбонизации расплава в циркуляционном вакууматоре с целью поиска рациональных технологических решений для достижения содержания углерода в стали менее 0,002 %. *Металлург.* 2025;(4):21–24. https://doi.org/10.52351/00260827_2025_4_21
6. Дагман А.И., Зайцев А.И., Калмыков К.Б., Арутюнян Н.А., Дунаев С.Ф., Лавров В.А. Развитие принципов достижения заданных характеристик неметаллических включений и качества стали. В кн.: *Сборник трудов XVII Международного Конгресса сталеплавильщиков и производителей металла ISCON-2023 «От руды до стали»*. Магнитогорск: Магнитогорский металлургический комбинат; 2023:54–59.
7. Саитгараев А.А. Совершенствование технологических режимов производства электротехнической изотропной стали с особонизким содержанием углерода и серы: автореф. дис. канд. техн. наук. Магнитогорск; 2024:22.
8. Liu B.S., Zhu G.S., Li B.H., Zhu L.X., Cui A.M., Li H.X. Optimization of parameters for high efficiency RH decarburization process. *Teshugang (Special steel)*. 2009;30:25–28.
9. Bi E. Research on optimization of RH decarburization process for ultra-low carbon steel. *Agricultural Mechanization Research*. 2019;(5):40. (In Chin.).
10. Zhou J., Luo G. Optimization of 210 t RH decarburization process for ultra-low carbon steel refining. *Special Steel*. 2015;36(6):33–35. (In Chin.).
11. Yuan B.H., Liu J.-H., Zhou H.-L., Huang J.-H., Zhang S., Shen Z.-P. Refining effect of IF steel produced by RH forced and natural decarburization process. *Chinese Journal of Engineering*. 2021;43(8):1107–1115. <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.10.10.002>
12. Chang C., Chen L., Liu C., Chen L., Cui H. Research on Optimization and Practice of IF Steel RH Decarburization Process Control. *Metallurgy and Technology*. 2020;(7): 53–57. (In Chin.).
13. An C., Li H., Zhang P., Li L., Du G., Liu X. Effect of oxygen content on liquid steel cleanliness after RH decarburization of IF steel. *Steelmaking*. 2023;39(2):24–27.
14. Luo Kaimin, Lan Tian, Lin Liping, He Zhibin. Analysis of influencing factors of RH decarbonization efficiency in IF steel. *Southern Metals*. 2025;(4):7–11. (In Chin.).
15. Wang X. Research on decarbonisation speed by RH vacuum treatment. *Henan Metallurgy*. 2006;14(S):117–121. (In Chin.).
16. Li T., Chen Y., Cheng D., Tang X., Fan J., Wu Z. Study on control technology of ultra-low dissolved oxygen content after RH decarburization. *Steelmaking*. 2025;41(5):24–29.
17. Yamana H., Takahashi M., Koyama S., Saito T., Katsuta J. Decarburization behavior in RH-degasser. *ISIJ International*. 1995;35(9):1016–1023.
18. Viertauer A., Mutsam N., Pernkopf F., Gantner A., Grimm G., Winkler W., Lammer G., Ratz A. Refractory condition monitoring and lifetime prognosis for RH degasser. In: *AISTech 2019 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference, 6–9 May 2019; Pittsburgh, Pa, USA*. Association for Iron & Steel Technology (AIST): Warrendale, PA; 2019:1083–1091.
19. Ding R., Blanpain B., Jones P.T., Wollants P. Modeling of the vacuum oxygen decarburization refining process. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2000;31:197–206. <https://doi.org/10.1007/s11663-000-0145-5>

20. Li Y.-H., Bao Y.-P., Wang M., Wang R., Tang D.-C. Influence of process conditions during Ruhrstahl-Heraeus refining process and effect of vacuum degassing on carbon

removal to ultra-low levels. *Ironmaking and Steelmaking*. 2015;42(5):366–372.
<https://doi.org/10.1179/1743281214Y.0000000236>

Сведения об авторах

Константин Николаевич Плешивцев, преподаватель кафедры металлургических технологий, Липецкий государственный технический университет
ORCID: 0009-0002-0555-745X
E-mail: pleshivtsev.konstantin@yandex.ru

Анатолий Алексеевич Метелкин, д.т.н., заместитель начальника научно-исследовательского центра, ПАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат», профессор кафедры металлургии железа и сплавов Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина
ORCID: 0000-0001-9069-1279
E-mail: anatoliy82@list.ru

Олег Юрьевич Шешуков, д.т.н., профессор, директор Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; главный научный сотрудник лаборатории проблем техногенных образований, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-2452-826X
E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Александр Николаевич Роготовский, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой металлургических технологий, Липецкий государственный технический университет
E-mail: arogotovskij@yandex.ru

Денис Константинович Егизарьян, к.т.н., доцент кафедры металлургии железа и сплавов Института новых материалов и технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина; заведующий лабораторией проблем техногенных образований, Институт металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН
ORCID: 0000-0002-9833-7191
E-mail: avari@mail.ru

Антон Васильевич Корюков, главный специалист по техническому развитию сталеплавильного производства, ПАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат»
E-mail: Anton.Koryukov@evraz.com

Information about the Authors

Konstantin N. Pleshivtsev, Lecturer of the Chair of Metallurgical Technologies, Lipetsk State Technical University
ORCID: 0009-0002-0555-745X
E-mail: pleshivtsev.konstantin@yandex.ru

Anatolii A. Metelkin, Dr. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Scientific Research Center, JSC EVRAZ NTMK; Prof. of the Chair of Metallurgy of Iron and Alloys of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin
ORCID: 0000-0001-9069-1279
E-mail: anatoliy82@list.ru

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin; Chief Researcher of the Laboratory of Technogenic Formations Problems, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-2452-826X
E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Aleksandr N. Rogotovskii, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Metallurgical Technologies, Lipetsk State Technical University
E-mail: arogotovskij@yandex.ru

Denis K. Egizaryan, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of Chair of Iron and Alloys Metallurgy, Ural Federal University named after first President of Russia B.N. Yeltsin; Head of the Laboratory of Technogenic Formations Problems, Vatin Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
ORCID: 0000-0002-9833-7191
E-mail: avari@mail.ru

Anton V. Koryukov, Chief Specialist in Technical Development of Steelmaking, JSC EVRAZ NTMK
E-mail: Anton.Koryukov@evraz.com

Вклад авторов

К. Н. Плешивцев – анализ влияния факторов снижения содержания углерода.
А. А. Метелкин – подготовка текста статьи, структурирование статьи, проведение испытаний.
О. Ю. Шешуков – выбор направления исследования, общий анализ данных, редактирование текста статьи.
А. Н. Роготовский – анализ влияния факторов удаления углерода.
Д. К. Егизарьян – рассмотрение влияния факторов удаления углерода по 1 и 2 способу.
А. В. Корюков – проведение испытаний, анализ влияния факторов.

Contribution of the Authors

K. N. Pleshivtsev – analysis of the influence of carbon reduction factors.
A. A. Metelkin – writing the text, structuring of the article, conducting the tests.
O. Yu. Sheshukov – selection of the research area, general data analysis, editing the text.
A. N. Rogotovskii – analysis of the influence of carbon removal factors.
D. K. Egizaryan – consideration of the influence of carbon removal factors by methods 1 and 2.
A. V. Koryukov – conducting the tests, analysis of the influence of carbon removal factors.

Поступила в редакцию 07.08.2025
После доработки 10.12.2025
Принята к публикации 12.01.2026

Received 07.08.2025
Revised 10.12.2025
Accepted 12.01.2026