Оригинальная статья

УДК 519:669.27

DOI 10.17073/0368-0797-2021-8-543-549

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ВОДОРОДА В ЦИРКУЛЯЦИОННОМ ВАКУУМАТОРЕ В УСЛОВИЯХ КЦ-2 ПАО «НЛМК»

К. Н. Плешивцев¹, О. Ю. Шешуков^{2,3}, А. А. Метелкин⁴, О. И. Шевченко⁴

¹ ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» (Россия, 398040, Липецк, пл. Металлургов, 2)

² Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19)

³ Институт металлургии УрО РАН (Россия, 620002, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

⁴ Нижнетагильский институт (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (Россия, 622031, Свердловская обл., Нижний Тагил, Красногвардейская ул., 59)

Аннотация. Для выплавки высококачественной стали необходимо поэтапное производство в металлургических агрегатах, способных к выпуску продукции с высокими эксплуатационными свойствами и низким содержанием вредных примесей. Одной из вредных примесей является водород и важно ограничить его содержание в металле. Для обеспечения заданного содержания водорода металл на участке внепечной обработки стали КЦ-2 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» подвергают обработке вакуумом в установке циркуляционного вакуумирования. Несмотря на распространенность циркуляционных вакууматоров, теоретически механизм удаления водорода в этих металлургических агрегатах изучен недостаточно. Для повышения эффективности удаления водорода проведены теоретические расчеты по удалению его из металла. Существует несколько механизмов удаления водорода: непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство; образование пузырей газа в металле и их непосредственное всплытие; зарождение пузырей водорода на границе огнеупорной кладки с металлом; удаление водорода при продувке металла нейтральным газом (аргоном). Показано, что основными путями удаления водорода в установке циркуляционного вакуумирования являются непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство и продувка расплава транспортирующим газом. В конвертерном цехе № 2 ПАО «НЛМК» на установке циркуляционного вакуумирования реализуются оба пути. Вакуумные насосы обеспечивают давление в вакуум-камере менее 101,3 Па (0,001 атм.). Это способствует интенсивному удалению водорода с поверхности металла. Для обеспечения циркуляции металла во впускной патрубке установки RH подается транспортирующий газ аргон, который также принимает участие в удалении растворенных газов путем перехода водорода в пузырьки нейтрального газа. Дополнительно проведенные расчеты показали, что основной путь дегазации в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» – это удаление водорода в пузырьки транспортирующего газа.

Ключевые слова: удаление водорода, циркуляционный вакууматор, внепечная обработка стали, дегазация

Для цитирования: Плешивцев К.Н., Шешуков О.Ю., Метелкин А.А., Шевченко О.И. Изучение процесса удаления водорода в циркуляционном вакууматоре в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 8. С. 543–549.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-543-549>

Original article

HYDROGEN REMOVAL IN CIRCULATING VACUUM DEGASSER UNDER CONDITIONS OF PJSC “NLMK”

K. N. Pleshivtsev¹, O. Yu. Sheshukov^{2,3}, A. A. Metelkin⁴, O. I. Shevchenko⁴

¹ PJSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (2 Metallurgov Sqr., Lipetsk 398040, Russian Federation)

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (19 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

³ Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (28 Mira Str., Yekaterinburg 620002, Russian Federation)

⁴ Nizhny Tagil Institute (Branch) of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (59 Krasnogvardeyskaya Str., Nizhny Tagil, Sverdlovsk Region 622031, Russian Federation)

Abstract. For high-quality steel smelting, stage-by-stage production is required, which has a complex of metallurgical units capable for producing products with high performance properties and low content of harmful impurities. One of the harmful impurities is hydrogen, so it is important to limit its content in the metal. To ensure the specified hydrogen content, the metal in the steel out-of-furnace treatment at Converter Shop No. 2 (CS-2) of PJSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (“NLMK”) is subjected to vacuum treatment in a circulating vacuum degasser. Despite the prevalence of circulating vacuum derassers, theoretically, mechanism of hydrogen removal in these metallurgical units has been insufficiently studied. To increase efficiency of hydrogen removal, theoretical calculations were performed to remove it from the metal. There are several mechanisms for hydrogen

removing: direct transfer of hydrogen from metal to the surrounding space; formation of gas bubbles in metal and their direct ascent; nucleation of hydrogen bubbles at the border of refractory wall and metal; removal of hydrogen by metal blowing with neutral gas (argon). It is shown that the main ways of hydrogen removal in a circulating vacuum degasser are direct transfer of hydrogen from metal to the surrounding space and blowing of melt with transporting gas. In the CS-2 of PJSC “NLMK”, both ways are implemented at a circulating vacuum degasser. Vacuum pumps provide pressure in a vacuum chamber of less than 101.3 Pa (0.001 atm.). It promotes intensive removal of hydrogen from the metal surface. To ensure circulation of metal, transporting gas argon is supplied to the inlet pipe of the RH degasser, which also takes part in removal of dissolved gases by transferring hydrogen to neutral gas bubbles. Additionally, performed calculations have shown that the main way of degassing in conditions of CS-2 of PJSC “NLMK” is removal of hydrogen into the bubbles of carrier gas.

Keywords: hydrogen removal, circulating vacuum degasser, out-of-furnace steel treatment, degassing

For citation: Pleshivtsev K.N., Sheshukov O.Yu., Metelkin A.A., Shevchenko O.I. Hydrogen removal in circulating vacuum degasser under conditions of PJSC “NLMK”. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 8, pp. 543–549. (In Russ.).

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-8-543-549>

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время современным металлургическим предприятиям необходимо решать задачи по выпуску качественной и конкурентоспособной продукции. Для выплавки высококачественной стали необходимо поэтапное производство – комплекс металлургических агрегатов [1, 2]. На каждом из этапов решается задача рафинирования металла, а также его подготовка к разливке.

Водород является вредной примесью, снижающей эксплуатационные свойства изделий [3 – 9], поэтому важно ограничить его содержание в металле не более 2 ppm [10, 11].

Для обеспечения заданного содержания водорода металл на участке внепечной обработки стали КЦ-2 ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат» его подвергают обработке вакуумом в установке циркуляционного вакуумирования.

Несмотря на распространенность циркуляционных вакууматоров, теоретически механизм удаления водорода в этих металлургических агрегатах изучен недостаточно [1, 12 – 14].

Известно, что удаление газов возможно по следующим механизмам [12 – 14]: *I* путь – непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство; *II* путь – образование пузырей газа в металле и их непосредственное всплытие; *III* путь – зарождение пузырей водорода на границе огнеупорной кладки с металлом; *IV* путь – удаление водорода при продувке металла нейтральным газом (аргоном).

Варианты удаления газов из стали представлены на рис. 1.

В исследованиях, представленных в работах [10 – 12], было показано, что основными путями для удаления газов (водорода) являются *I* и *IV*, то есть непосредственный переход водорода из металла в окружающее пространство и продувка расплава нейтральным газом.

В вакууматоре циркуляционного типа реализуются оба пути. Например, в КЦ-2 ПАО «НЛМК» вакуумные насосы обеспечивают давление в вакуум-камере менее 0,001 атм. (101,3 Па), что способствует интенсивному удалению водорода с поверхности металла. Дополни-

тельно для обеспечения циркуляции металла во впускной патрубок установки *RH* подается транспортирующий газ (аргон), который также принимает участие в удалении растворенных газов путем перехода водорода в пузырьки нейтрального газа. Пути удаления водорода показаны на рис. 2.

Несмотря на давность (1959 г.) разработки процесса циркуляционного вакуумирования [12] и достигаемые пределы удаления водорода [13, 15 – 17], до конца не выявлено, какой из представленных механизмов является преобладающим.

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ЧАСТЬ

Целью настоящей работы является определение основных путей удаления водорода из металла в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК».

Рис. 1. Пути удаления водорода из металла

Fig. 1. Ways of hydrogen removal from the metal

Рис. 2. Пути удаления водорода в вакуум-камере

Fig. 2. Ways to hydrogen removal in vacuum chamber

Скорость удаления водорода в циркуляционном вакууматоре [6, 11] описывается следующим уравнением:

$$[H]_t = ([H]_0 - [H]_P) 10^{-0,227n} + [H]_P, \quad (1)$$

где $[H]_t$ – конечное содержание водорода через время t ; $[H]_P = 0,64$ ppm – равновесное содержание водорода при $P = 0,07$ кПа (остаточное давление в вакуум-камере); $[H]_0$ – начальное содержание водорода до обработки; $\eta = \frac{Qt}{M}$ – кратность циркуляции; Q – количество металла, поступающего в вакуум-камеру (скорость циркуляции), т/мин; M – масса металла в сталеразливочном ковше, т.

Известно, что скорость удаления водорода зависит от скорости массопереноса металла во впускном патрубке вакуум-камеры. В работах [18 – 24] представлены различные эмпирические формулы, по которым рассчитывают скорость расплава во впускном патрубке в зависимости от различных технологических и конструктивных параметров металлургического агрегата. Наиболее удовлетворительно скорость металла

во впускном патрубке циркуляционного вакууматора описывается уравнением, выведенным японскими учеными [25].

Представленное уравнение (1) учитывает различные технологические и конструктивные параметры циркуляционного вакууматора за счет коэффициента η кратности циркуляции.

Графически выражение (1) представлено на рис. 3 при начальном содержании водорода в металле 6 ppm.

Удаление водорода в циркуляционном вакууматоре [12] описывается уравнением

$$\frac{c_E^{(t)} - c_P}{c_E^{(0)} - c_P} = e^{-\beta t}, \quad (2)$$

где $c_E^{(0)}$ и $c_E^{(t)}$ – концентрация газа в металле, втекающем в вакуум-камеру в начальный момент времени и t ; c_P – равновесная концентрация газа в металле в вакуум-камере.

Тогда конечное содержание $c_E^{(t)}$ водорода будет равно

$$c_E^{(t)} = c_P + (c_E^{(0)} - c_P) e^{-\beta t}; \quad (3)$$

Рис. 3. Общее удаление водорода с поверхности металла за счет всплывающих пузырьков нейтрального газа

Fig. 3. Total hydrogen removal from the metal surface due to floating bubbles of neutral gas

$$\beta = \left[\left(\frac{V}{V^*} - 1 \right) \left(\frac{V^*}{\dot{V}} + \frac{V^*}{\kappa^* F^*} \right) \right]^{-1}, \quad (4)$$

где V – объем металла в сталеразливочном ковше; V^* и $\dot{V}$ – объем металла, находящегося в вакуум-камере и протекающего в единицу времени через вакуум-камеру; κ^* – коэффициент массопереноса; F^* – поверхность дегазации порций металла.

По данным работы [12] соотношение $\frac{V^*}{\kappa^* F^*}$ соответствует значению $0,1 \text{ C}^{-1}$.

Если принять, что $\dot{V}$ – объем металла, протекающего в единицу времени, будет соответствовать объему металла, из которого удаляется водород с поверхности расплава в единицу времени, то получим уравнение удаления водорода с поверхности металла в единицу времени.

Для определения поверхностного объема металла в вакуум-камере, из которого происходит удаление водорода, необходимо знать глубину зарождения пузырьков газа. Если площадь поверхности постоянна и составляет $5,2 \text{ м}^2$ для условий агрегата циркуляционного вакуумирования ПАО «НЛМК», то глубина зарождения пузырьков газа зависит от концентрации водорода в металле и определяется уравнением [1, 12, 26]:

$$h = 142 \left(\frac{[H]^2}{738,87} - P \right); \quad (5)$$

здесь P – давление в вакуум-камере, атм.; H – концентрация водорода в металле в единицу времени, ppm.

В условиях промышленного вакуумирования достигаются давления P менее $0,001 \text{ атм.}$, что обеспечивает удаление водорода с поверхности расплава при его концентрации в стали не менее $3,5 \text{ ppm}$.

Используя уравнения (2), (4) и (5), можно определить количество удаляемого водорода с поверхности металла. Расчетные данные представлены на рис. 4, кривая 1.

Дополнительно необходимо рассмотреть вопрос о возможном пределе удаления водорода по первому пути, то есть удаления с поверхности металла.

По данным работы [13] минимальному давлению насыщения, при котором способны образовываться пузырьки водорода на поверхности металла, соответствуют концентрации водорода в расплаве, определяемые по следующему уравнению:

$$[H] = K_{H_2} \sqrt{P_{\text{нас min}}}, \quad (7)$$

где $K_{H_2} = 28,55 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ – константа растворимости водорода в железе при температуре 1600 °C [1]; $P_{\text{нас min}}$ – минимальное давление насыщения, Па.

Соответственно при давлениях насыщения меньше величины $P_{\text{нас min}}$ устойчивые, способные к росту газовые пузырьки не зарождаются. Из работы [7] этот параметр определяется по формуле

$$P_{\text{нас min}} = P + 4\sqrt{\sigma \rho g}, \quad (8)$$

Общее удаление водорода и удаление водорода с поверхности расплава в зависимости от кратности циркуляции металла (η) в циркуляционном вакууматоре

Total hydrogen removal and hydrogen removal from the melt surface, depending on the rate of metal circulation (η) in circulating vacuum degasser

η	Общее удаление водорода, ppm	Удаление водорода с поверхности расплава, ppm
0	6,00	6,00
0,5	4,77	5,56
1,0	3,82	5,20
1,5	3,09	4,89
2,0	2,52	4,63
2,5	2,09	4,41
3,0	1,76	4,22
3,5	1,50	4,05
4,0	1,30	3,91
4,5	1,15	3,78
5,0	1,03	3,66
5,5	0,94	3,56
6,0	0,87	3,50
6,5	0,82	3,50
7,0	0,78	3,50
7,5	0,75	3,50
8,0	0,72	3,50

Рис. 4. Удаление водорода с поверхности расплава (1) и общее удаление водорода (2) в зависимости от кратности циркуляции металла в циркуляционном вакууматоре

Fig. 4. Hydrogen removal from the melt surface (1) and total hydrogen removal (2) depending on the rate of metal circulation in circulating vacuum degasser

где σ – поверхностное натяжение металла, кДж/м²; ρ – плотность стали, г/см³; g – ускорение свободного падения, см/с².

Для условий работы ПАО «НЛМК» и по данным работ [1, 27] этот показатель будет соответствовать 1539 Па.

Минимальное содержание водорода в стали, удаление которого возможно путем зарождения с поверхности металла, будет соответствовать значению 3,5 ppm. При содержании водорода менее 3,5 ppm его удаление возможно только по пути взаимодействия с пузырьками транспортирующего газа.

Объединяя расчетные показатели общего удаления водорода из металла и показатели удаления водорода путем образования пузырьков на поверхности расплава с пределом удаления по рассматриваемому пути, получим значения, представленные в таблице и на рис 4.

Выводы

Удаление водорода с поверхности расплава не является основным механизмом дегазации. При концентрации водорода в стали менее 3,5 ppm образование пузырьков водорода с поверхности металла прекращается. Основной путь дегазации в условиях КЦ-2 ПАО «НЛМК» – это удаление водорода в пузырьки транспортирующего газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Бигеев А.М. Бигеев В.А. *Металлургия стали. Теория и технология плавки стали*. Магнитогорск: МГТУ, 2000. 544 с.
2. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. *Производство стали. Т. 3. Внепечная металлургия стали*. М.: Теплотехник, 2008. 544 с.
3. Шаповалов В.И., Трофименко В.В. *Флокены и контроль водорода в стали*. М.: Металлургия, 1987. 160 с.
4. Ardelean E., Hepuț T., Vătășescu M., Crișan E. Researches regarding the influence of vacuum parameters on the efficiency of gas removal from the liquid steel // *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 254. P. 218–223. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.254.218>
5. Socalici A., Popa E., Hepuț T., Drăgoi F. Researches regarding the improvement of the steel quality // *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 216. P. 273–278. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.216.273>
6. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Numerical study on the removal of hydrogen and nitrogen from the melt of medium carbon steel in vacuum tank degasser // *Materials Science Forum*. 2013. Vol. 762. P. 253–260. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.762.253>
7. Stenholm K., Andersson M., Tilliander A., Jönsson P.G. Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing // *Ironmaking & Steelmaking*. 2013. Vol. 40. No. 3. P. 199–205. <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000029>
8. Fábíán E.R., Dévényi L. Hydrogen in the plastic deformed steel // *Materials Science Forum*. 2007. Vol. 537–538. P. 33–40. <https://doi.org/10.4028/0-87849-426-x.33>
9. Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Zuev L.B. Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 880. P. 42–47. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.42>
10. Морозов А.Н. *Водород и азот в стали*. М.: Металлургия, 1968. 283 с.
11. Ефимов С.В. Технологические аспекты удаления водорода с использованием установки ковшевого вакуумирования стали.
1. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Metallurgy of Steel. Theory and Technology of Steel Smelting*. Magnitogorsk: MSTU, 2000, 544 p. (In Russ.).
2. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Production of Steel. Vol. 3. Out-of-Furnace Metallurgy of Steel*. Moscow: Teplotekhnika, 2008, 544 p. (In Russ.).
3. Shapovalov V.I., Trofimenko V.V. *Flakes and Hydrogen Control in Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1987, 160 p. (In Russ.).
4. Ardelean E., Hepuț T., Vătășescu M., Crișan E. Researches regarding the influence of vacuum parameters on the efficiency of gas removal from the liquid steel. *Solid State Phenomena*. 2016, vol. 254, pp. 218–223. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.254.218>
5. Socalici A., Popa E., Hepuț T., Drăgoi F. Researches regarding the improvement of the steel quality. *Solid State Phenomena*. 2014, vol. 216, pp. 273–278. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.216.273>
6. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Numerical study on the removal of hydrogen and nitrogen from the melt of medium carbon steel in vacuum tank degasser. *Materials Science Forum*. 2013, vol. 762, pp. 253–260. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.762.253>
7. Stenholm K., Andersson M., Tilliander A., Jönsson P.G. Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing. *Ironmaking & Steelmaking*. 2013, vol. 40, no. 3, pp. 199–205. <https://doi.org/10.1179/1743281212Y.0000000029>
8. Fábíán E.R., Dévényi L. Hydrogen in the plastic deformed steel. *Materials Science Forum*. 2007, vol. 537–538, pp. 33–40. <https://doi.org/10.4028/0-87849-426-x.33>
9. Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Zuev L.B. Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels. *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 880, pp. 42–47. <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.880.42>
10. Morozov A.N. *Hydrogen and Nitrogen in Steel*. Moscow: Metallurgiya, 1968, 283 p. (In Russ.).
11. Efimov S.V. Technological aspects of hydrogen removal using a ladle vacuum degasser for steel. In: *Converter Steelmaking. Coll.*

- В кн.: Конвертерное производство стали. Сб. науч. тр. Екатеринбург: УрО РАН, 2003. С. 203–207.
12. Кнүппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Основы и технология ковшовой металлургии / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1984. 414 с.
 13. Кнүппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Термодинамические и кинетические закономерности / Пер. с нем. М.: Металлургия, 1973. 312 с.
 14. Метелкин А.А., Шешуков О.Ю., Некрасов И.В., Шевченко О.И., Корогодский А.Ю. К вопросу удаления водорода из металла в вакууматоре циркуляционного типа // Теория и технология металлургического производства. 2016. № 1 (18). С. 29–33.
 15. Селиванов В.Н., Буданов Б.А., Аланкин Д.В. Кинетическая модель удаления водорода при циркуляционном вакуумировании стали // Теория и технология металлургического производства. 2013. № 1 (13). С. 31–33.
 16. Минаев Ю.А., Яковлев В.В. Физико-химия в металлургии. (Термодинамика. Гидродинамика. Кинетика). М.: МИСИС, 2001. 320 с.
 17. Гизатулин Р.А., Дмитриенко В.И. Внепечные и ковшевые процессы обработки стали. Новокузнецк: изд. СибГИУ, 2006. 181 с.
 18. Hupfer P., Abratis H., Maas H., Manfred M. Strömungsmechanische und reaktionskinetische Vorgänge bei der Vakuumbehandlung von flüssigem Stahl nach dem Umlaufverfahren // Archiv für das Eisenhüttenwesen. 1971. Bd. 42. No. 11. S. 761–767.
<https://doi.org/10.1002/srin.197102663>
 19. Yamaguchi K., Kishimoto Y., Sakuraya T., Fujii T., Aratani M., Nishikawa H. Effect of refining conditions for ultra low carbon steel on decarburization reaction in RH degasser // ISIJ International. 1992. Vol. 32. No. 1. P. 126–135.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.126>
 20. Young-Geun Park, Won-Chul Doo, Kyung-Woo Yi, Sang-Bok An. Numerical calculation of circulation flow rate in the degassing rheinstahl-heraeus process // ISIJ International. 2000. Vol. 40. No. 8. P. 749–755. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.749>
 21. Young-Geun Park, Kyung-Woo Yi, Sang-Bog Ahn. The effect of operating parameters and dimensions of the RH system on melt circulation using numerical calculations // ISIJ International. 2001. Vol. 41. No. 5. P. 403–409.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.403>
 22. Kato Y., Fujii T., Suetsugu S., Ohmiya S., Aizawa K. Effect of geometry of vacuum vessel on decarburization rate and final carbon content in RH degasser // Tetsu-to-Hagane. 1993. Vol. 79. No. 11. P. 1248–1253. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1995.79.11_1248
 23. Takahashi M., Matsumoto H., Saito T. Mechanism of decarburization in RH degasser // ISIJ International. 1995. Vol. 35. No. 12. P. 1452–1458. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1452>
 24. Kitamura T., Miyamoto K., Tsujino R., Mizoguchi S., Kato K. Mathematical model for nitrogen in vacuum degasser desorption and decarburization reaction in vacuum degasser // ISIJ International. 1996. Vol. 36. No. 4. P. 395–401.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.395>
 25. Ono K., Yanagida M., Katoh T., Miwa M., Okamoto T. The Circulation Rate of RH-Degassing Process by Water Model Experiment // Denki Seiko. 1981. Vol. 56. No. 7. P. 149–157.
 26. Темберген Д., Теворт Р., Робей Р. Обработка стали в ковше с использованием технологии циркуляционного вакуумирования // Металлургическое производство и технология. 2007. № 2. С. 12–16.
 27. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. 528 с.
 - of Sci. Papers. Yekaterinburg: UB RAS, 2003, pp. 203–207. (In Russ.).
 12. Knüppel H. *Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen. Bd. 2, Grundlagen und verfahren der Pfannenmetallurgie*. Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1983. (In Germ.). (Russ. ed.: Knyuppel' G. *Raskislenie i vakuumnaya obrabotka stali. Osnovy i tekhnologiya kovshovoi metallurgii*. Moscow: Metallurgiya, 1984, 414 p.).
 13. Knüppel H. *Desoxydation und Vakuumbehandlung von Stahlschmelzen. Bd. 1. Thermodynamische und kinetische Grundlagen*. Düsseldorf: Verl. Stahleisen, 1983. (In Germ.) (Russ. ed.: Knyuppel' G. *Raskislenie i vakuumnaya obrabotka stali. Termodinamicheskie i kineticheskie zakonomernosti*. Moscow: Metallurgiya, 1973, 312 p. (In Russ.).
 14. Metelkin A.A., Sheshukov O.Yu., Nekrasov I.V., Shevchenko O.I., Korogodskii A.Yu. On removing hydrogen from metal in a circulating vacuum degasser. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2016, no. 1 (18), pp. 29–33. (In Russ.).
 15. Selivanov V.N., Budanov B.A., Alankin D.V. Kinetic model of hydrogen removal during circulation vacuum degassing of steel. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2013, no. 1 (13), pp. 31–33. (In Russ.).
 16. Minaev Yu.A., Yakovlev V.V. *Physical Chemistry in Metallurgy (Thermodynamics. Hydrodynamics. Kinetics)*. Moscow: NUST "MISIS", 2001, 320 p. (In Russ.).
 17. Gizatulin R.A., Dmitrienko V.I. *Out-of-Furnace and Ladle Processing of Steel*. Novokuznetsk: izd. SibSIU, 2006, 181 p. (In Russ.).
 18. Hupfer P., Abratis H., Maas H., Manfred M. Strömungsmechanische und reaktionskinetische Vorgänge bei der Vakuumbehandlung von flüssigem Stahl nach dem Umlaufverfahren. *Archiv für das Eisenhüttenwesen*. 1971, vol. 42, no. 11, pp. 761–767. (In Germ.).
<https://doi.org/10.1002/srin.197102663>
 19. Yamaguchi K., Kishimoto Y., Sakuraya T., Fujii T., Aratani M., Nishikawa H. Effect of refining conditions for ultra low carbon steel on decarburization reaction in RH degasser. *ISIJ International*. 1992, vol. 32, no. 1, pp. 126–135.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.32.126>
 20. Young-Geun Park, Won-Chul Doo, Kyung-Woo Yi, Sang-Bok An. Numerical calculation of circulation flow rate in the degassing Rheinstahl-Heraeus process. *ISIJ International*. 2000, vol. 40, no. 8, pp. 749–755. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.40.749>
 21. Young-Geun Park, Kyung-Woo Yi, Sang-Bog Ahn. The effect of operating parameters and dimensions of the RH system on melt circulation using numerical calculations. *ISIJ International*. 2001, vol. 41, no. 5, pp. 403–409.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.41.403>
 22. Kato Y., Fujii T., Suetsugu S., Ohmiya S., Aizawa K. Effect of geometry of vacuum vessel on decarburization rate and final carbon content in RH degasser. *Tetsu-to-Hagane*. 1993, vol. 79, no. 11, pp. 1248–1253. https://doi.org/10.2355/tetsutohagane1995.79.11_1248
 23. Takahashi M., Matsumoto H., Saito T. Mechanism of decarburization in RH degasser. *ISIJ International*. 1995, vol. 35, no. 12, pp. 1452–1458. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.35.1452>
 24. Kitamura T., Miyamoto K., Tsujino R., Mizoguchi S., Kato K. Mathematical model for nitrogen in vacuum degasser desorption and decarburization reaction in vacuum degasser. *ISIJ International*. 1996, vol. 36, no. 4, pp. 395–401.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.395>
 25. Ono K., Yanagida M., Katoh T., Miwa M., Okamoto T. The circulation rate of RH-degassing process by water model experiment. *Denki Seiko*. 1981, vol. 56, no. 7, pp. 149–157.
 26. Tembergen D., Tervort R., Robei R. Treatment of steel in a ladle using technology of circulating vacuum degassing. *Metallurgicheskoe proizvodstvo i tekhnologiya*. 2007, no. 2, pp. 12–16. (In Russ.).
 27. Kudrin V.A. *Theory and Technology of Steelmaking*. Moscow: Mir, AST, 2003, 528 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Константин Николаевич Плешивцев, начальник участка конвертерного цеха № 2, ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

E-mail: Pleshivtsev_kn@nlmk.com

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 порошковых, композиционных и наноматериалов, Институт металлургии УрО РАН

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Олег Игоревич Шевченко, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой металлургической технологии, Нижнетагильский технологический институт филиал Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: Shevchenko-OI@ntiustu.ru

Анатолий Алексеевич Метелкин, к.т.н., старший преподаватель кафедры металлургической технологии, Нижнетагильский технологический институт (филиал) Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

E-mail: anatoliy82@list.ru

Konstantin N. Pleshivtsev, Head of the Section of Converter Shop No. 2, PJSC "Novolipetsk Metallurgical Plant"

E-mail: Pleshivtsev_kn@nlmk.com

Oleg Yu. Sheshukov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Director of the Institute of New Materials and Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Chief Researcher of the Laboratory of Powder, Composite and Nano-Materials, Institute of Metallurgy, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences

E-mail: o.j.sheshukov@urfu.ru

Oleg I. Shevchenko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair of Metallurgical Technology, Nizhny Tagil Technological Institute (Branch) of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: Shevchenko-OI@ntiustu.ru

Anatolii A. Metelkin, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer of the Chair of Metallurgical Technology, Nizhny Tagil Technological Institute (Branch) of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin

E-mail: anatoliy82@list.ru

Поступила в редакцию 08.10.2020

После доработки 19.11.2020

Принята к публикации 25.02.2021

Received 08.10.2020

Revised 19.11.2020

Accepted 25.02.2021