

ISSN 0132 – 0890

www.rudmet.ru

Черные металлы

Издается с 1961 года
(№ 1080)

12.2021

Тема номера: Производство чугуна (стр. 4–24).

Производство стали и литейное производство (стр. 25–50).

ЧЕРНЫЕ МЕТАЛЛЫ

Издательский дом
«Руда и Металлы»

№ 12 (1080), декабрь 2021 г.

Издается с 1961 г.

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения

Учредители:

Акционерное общество
«Издательский дом
«Руда и Металлы»

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский
технологический университет «МИСиС»

Федеральное бюджетное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Магнитогорский государственный технический
университет им. Г. И. Носова»

При участии:

ПАО «ММК»
ОАО «БМЗ — управляющая компания холдинга «БМК»
Государственного Эрмитажа
Журнала «Stahl und Eisen»

Официальный информационный орган
Федерального УМО
«Технологии материалов»

Редакционный совет:

Председатель редакционного совета: О. Н. Сосковец

Главный редактор: В. М. Колокольцев

Первый зам. главного редактора: К. Л. Косырев

Зам. главного редактора: А. Г. Воробьев, Е. В. Цирульников

А. М. Беленький, В. Блек (Германия), Ю. Л. Бобарикин (Беларусь), О. И. Борискин, И. В. Буторина,
Р. М. Валеев, Е. П. Волынкина, А. В. Выдрин, С. П. Галкин, Е. А. Голи-Оглу (Дания), Я. М. Гордон (Канада),
Д. Г. Еланский, Н. А. Зюбан, В. П. Иващенко (Украина), И. Е. Илларионов, Л. М. Капуткина, А. А. Казаков,
А. П. Коликов, А. Г. Корчунов, А. В. Кушнарв, И. О. Леушин, В. А. Луценко (Украина), И. П. Мазур,
Ю. Ю. Пиотровский, А. Н. Савенок (Беларусь), А. В. Серебряков, И. А. Султангузин, С. С. Ткаченко,
А. Я. Травянов, Н. А. Чиченев, М. В. Чукин, П. Шеллер (Германия), Е. А. Яценко

Редакция:

Зам. главного редактора: Е. В. Цирульников

Редактор Е. Ю. Рахманова

Издатель — АО «Издательский дом «Руда и Металлы»
Адрес издателя: 119049, Москва, Ленинский просп., 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 622

Адрес редакции:

фактический: 119049, Москва, Ленинский проспект 6,
стр. 2, МИСиС, оф. 617

почтовый: 119049, Москва, а/я № 71

Телефон/факс: (495) 955-01-75

Эл. почта: chernet@rudmet.ru, tsirulnikov@rudmet.ru

www.rudmet.ru

Ежемесячный научно-технический и производственный журнал
по актуальным проблемам металлургии и машиностроения
«Черные металлы» № 12 (1080), декабрь 2021 г.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере
связи, информационных технологий и массовых коммуникаций
(Свидетельство ПИ № ФС77-48681 от 28.02.2012 г.)

Товарный знак и название «Черные металлы» являются исключительной
собственностью Издательского дома «Руда и Металлы»

Отпечатано с предоставленных готовых файлов
в типографии «Канцлер»
150044, Россия, Ярославль, ул. Полушкина Роща, 16, стр. 66А.
Тел. (4852) 58-76-33

Дата выхода в свет: 20.01.2022. Формат 60×90/8.
Печ. л. 11. Офсетная печать. Бумага офсетная.

Тираж 1000 экз. Цена свободная

За достоверность рекламной информации ответственность несет рекламодатель
За достоверность научно-технической информации ответственность несет автор
Перепечатка материалов возможна только с письменного разрешения редакции
При перепечатке ссылка на «Черные металлы» обязательна
«Реклама» — материал публикуется на правах рекламы
Публикуемые материалы не обязательно отражают точку зрения редакции
и редсовета журнала

Подписные индексы:
12985 («Пресса России»)

ISSN 0132-0890



9 770132 089006 >

СОДЕРЖАНИЕ

Производство чугуна

- П. И. Черноусов, С. Н. Серегин, Р. Е. Гришин, А. Н. Чикалева.* Исследование доменного процесса с применением многокомпонентного дутья 4
- А. С. Харченко, С. К. Сивагатуллин, А. В. Павлов, А. А. Полинов.* Рациональные технологические решения при производстве чугуна в доменных печах ПАО «ММК». 10
- С. В. Албул, О. А. Кобелев, И. А. Левицкий, А. Г. Радюк.* Оценка эффективности конструкции теплоизолирующей вставки в дутьевой канал воздушной фурмы доменной печи 16
- П. Ф. Чернавин, А. В. Малыгин, Т. В. Деткова, В. Ю. Кучин.* Анализ и прогнозирование выхода годного и прочности агломерата на основе модели математического программирования 20

Производство стали и литейное производство

- В. А. Бигеев, С. К. Сивагатуллин, А. С. Харченко, М. В. Потапова.* Определение расхода водорода для твердофазного селективного восстановления комплексного железорудного сырья в лабораторных исследованиях 25
- А. Н. Шаповалов, С. П. Нефедьев, С. И. Платов, М. В. Харченко.* Совершенствование технологии вакуумной обработки колесной стали 30
- А. Ю. Агарков, Д. В. Руцкий, Н. А. Зюбан, Г. В. Бабин.* Влияние обработки расплава проволокой с Са- и Ва-наполнителем на фазовый состав и загрязненность неметаллическими включениями при внепечной обработке и разливке стали 26ХМФБА 36
- И. Е. Илларионов, Л. Ш. Пестряева, И. А. Стрельников, Ш. В. Садетдинов.* Разработка торфосодержащих смесей для теплоизоляции прибылей стальных отливок с использованием глицероборатов. 45

Производство труб

- С. П. Галкин, Ю. В. Гамин, А. С. Алещенко, Б. А. Романцев.* Современное развитие элементов теории, технологии и мини-станов радиально-сдвиговой прокатки 51
- А. В. Выдрин, А. С. Жуков, А. С. Тумашев, М. А. Павлова.* Ресурс пластичности высокохромистой стали 08X13H4M1Ф при прессовании 59
- К. Ю. Яковлева, Н. В. Фокин, Б. В. Баричко, Я. И. Космацкий.* Результаты исследования свойств и режимов изготовления труб из сплава ТМК-С 62

Нанесение покрытий и защита от коррозии

- Р. Р. Дема, С. И. Платов, Н. А. Девятерикова, Р. Г. Галин.* Оценка антизадирных свойств резьбового покрытия муфт НКТ, полученного термодиффузионным цинкованием и фрикционным плакированием. 68

Сертификация

- А. В. Краев, В. А. Иванова.* Декларирование соответствия в области металлургического производства. 74

Экономика и финансы

- И. Н. Федоренко, В. В. Макаров.* Внутренний контроль как инструмент антикризисной устойчивости металлургических компаний 79

- Годовое содержание.** 84

Журнал «Черные металлы» по решению ВАК Министерства образования и науки РФ включен в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук» по металлургии

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Chemical Abstracts Service

Журнал «Черные металлы» включен в Международную базу данных Scopus, II квартал (2020)

(по версии SCIMAGO)

7. Zayakin O. V. Development of a rational composition and technology for production of nickel-containing ferroalloys from poor oxidized nickel ores: thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Yekaterinburg: Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2002. 157 p.
8. Yucel O., Turan A., Yildirim H. Investigation of pyrometallurgical nickel pig iron (NPI) production process from lateritic nickel ores. *The 3rd International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*. 2012. pp. 17–23.
9. Kim J., Dodbiba G., Tanno H., Okayaa K., Matsuo S., Fujita T. Calculation of low-grade laterite for the concentration of Ni by magnetic separation. *Minerals Engineering*. 2010. No. 23. Iss. 4. pp. 282–288.
10. Sohn H. Y. Process modeling in non-ferrous metallurgy. Treatise on Process Metallurgy: Industrial Processes. Oxford: Elsevier Ltd., 2014. pp. 701–838.
11. Tsemekhman L. Sh., Ryabko A. G., Tsybulov L. B. et al. Cleaning of slags from copper and copper-nickel sulfide smelting. *Proceedings of the Copper 2003-Cobre 2003, Pyrometallurgy of Copper*. 2003. Vol. 4. pp. 353–366.
12. Ermakov I. G. Research, development and implementation of technology for electric melting of technogenic nickel-containing raw materials: thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. St. Petersburg, 2005. 185 p.
13. Bouasria M., Khadraoui F., Benzaama M. N. et al. Partial substitution of cement by the association of ferronickel slags and crepidula fornicata shells. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 33. p. 13.
14. Morachevskiy A. G., Tsemekhman L. Sh., Tsybulov L. B. et al. Thermodynamic properties of liquid iron-nickel-cobalt alloys. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2003. Vol. 76. Iss. 11. pp. 1779–1783.
15. Liu J., Zhou X., Luo Z. et al. Preparation and formation mechanism of ferronickel slag-based magnesium phosphate cement. *Jianzhu Cailiao Xuebao*. 2020. Vol. 23.
16. Fomichev V. B., Knyazev M. V., Tsybulov L. B. et al. Study of the slags depletion process by blowing with gas mixtures with different partial pressures of oxygen. *Tsvetnye Metally*. 2002. No. 9. pp. 32–36.
17. Zhu D., Xue Y., Pan J. et al. Strengthening sintering of limonitic nickel laterite by substituting ferronickel tailings for sintering fluxes. *The Mineral, Metals and Materials Series*. 2020. pp. 879–892.
18. Potapova M. V. Development of a technological scheme for production of refined ferronickel from poor iron-chromium-nickel ores: thesis of inauguration of Dissertation ... of Candidate of Engineering Sciences. Magnitogorsk, 2006. 20 p.
19. Kolokoltsev V. M., Bigeev V. A., Sibagatullin S. K. Limiting degree of hydrogen utilization in reactions of iron reduction from oxides. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2010. No. 10. pp. 4–11.
20. Sibagatullin S. K., Kharchenko A. S., Chernov V. P., Beginyuk V. A. Improvement of blast furnace practice due to creation of the conditions for elevation of natural gas consumption via usage of raw materials with increased strength. *Chernye Metally*. 2017. No. 8. pp. 27–33.
21. Sibagatullin S. K., Kharchenko A. S., Beginyuk V. A. et al. Improvement of the blast furnace process by increasing the natural gas consumption in gas dynamics in the upper stage of heat exchange. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2017. Vol. 15. No. 1. pp. 37–44.
22. Wang F., Marcuson S., Khajavi L. T. et al. Optimum treatment time for solid-state extraction of nickel from nickel sulfide concentrates at 1073 K. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 2020. Vol. 51. Iss. 6. pp. 2642–2652.
23. Sagadin C., Luidold S., Wagner C. et al. Phase Reaction between Refractory and High-Acidic Synthetic CaO-Ferronickel Slag. *Journal of the Minerals Metals & Materials Society (JOM)*. 2018. Vol. 70. Iss. 1. pp. 34–40.
24. Moskalyk R. R., Alfantazi A. M. Nickel laterite processing and electro winning practice. *Minerals Engineering*. 2002. Vol. 15. Iss. 8. pp. 593–605.
25. Mikheev M. A., Sheshukov O. Yu., Lobanov D. A. Slag technogenic formations as a material for the production of silicate products and pig iron. *Solid State Phenomena*. 2018. Vol. 284. pp. 1119–1126.
26. Nikiforov B. A., Bigeev V. A., Bigeev A. M. et al. Prospects for involving new types of iron-containing raw materials into processing. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2004. No. 2. pp. 7–10.

УДК 669.18

Совершенствование технологии вакуумной обработки колесной стали

А. Н. Шаповалов, заведующий кафедрой металлургических технологий и оборудования¹, канд. техн. наук, доцент
С. П. Нефедьев, старший научный сотрудник научно-инновационного сектора², канд. техн. наук
С. И. Платов, заведующий кафедрой машин и технологий обработки давлением и машиностроения², докт. техн. наук, профессор
М. В. Харченко, доцент², канд. техн. наук, эл. почта: kharchenko.mv@bk.ru

¹ Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС», Новотроицк, Россия.

² ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова», Магнитогорск, Россия.

Представлен анализ данных о производстве колесных марок сталей «2» и «Т» по ГОСТ 10791–2011 в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь». На большинстве плавков содержания водорода и азота существенно меньше регламентированных, что свидетельствует о нерациональном режиме вакуумирования, приводящем к увеличению энергетических затрат на передел, и об имеющихся резервах для совершенствования технологии вакуумирования. Определено, что для гарантированного получения содержания водорода менее 1,5 ppm и азота до 0,007 % необходимо проводить вакуумную обработку стали при остаточном давлении в вакуум-камере до 3 мбар, продолжительности обработки при глубоком вакууме не менее 20 мин, расходе аргона на продувку не менее 0,05 м³/т, перегреве металла от 110 до 130 °С. Диапазон перегрева стали перед началом вакуумирования обеспечивает оптимальные температурные условия разлива стали. Оптимальная температура перегрева металла в начале обработки на установке вакуумирования стали (УВС) составляет 115–125 °С при продолжительности вакуумной обработки 50–55 мин (потери температуры металла 70–75 °С), при перегреве металла в сталеразливочном ковше перед началом разлива 35–45 °С и при потерях температуры металла при транспортировке от УВС до разлива — 5 °С (15 мин). Получены уравнения регрессии, позволяющие прогнозировать результаты дегазации, а также подбирать величины параметров вакуумной обработки с целью достижения заданного содержания растворенных газов — водорода ([H], ppm) и азота ([N], % (мас.)).

Ключевые слова: вакуумная обработка, камерный вакууматор, колесная сталь, длительность глубокого вакуумирования, минимальное давление в вакуум-камере, температура перегрева металла, расход аргона.

DOI: 10.17580/chm.2021.12.06

Введение

К сталям для изготовления железнодорожных колес предъявляют повышенные требования по содержанию растворенных газов — водорода и азота. Так, в соответствии с техническими условиями на изготовление цельнокатанных колес (ГОСТ 10791–2011 [1]), массовая доля водорода в жидкой стали не должна превышать 2 ppm, а требования по содержанию азота определяют исходя из условий обеспечения регламентированных механических свойств. Поскольку азот снижает пластические свойства и контактно-усталостную прочность при эксплуатации [2–4], то его содержание в колесных сталях ограничивают до 0,006–0,008 % (мас.). Ограничения по содержанию азота также обусловлены его отрицательным влиянием на горячую пластичность стали, что необходимо учитывать при выборе температурно-скоростного режима непрерывной разливки [5–9]. Поэтому колесные марки стали (ГОСТ 10791–2011) обязательно подвергают вакуумированию. Другой причиной обязательной вакуумной обработки является повышенные требования ГОСТ 10791–2011 к внутренним дефектам, выявляемым при ультразвуковом контроле (УЗК), и к уровню загрязненности стали неметаллическими включениями, особенно недеформирующимися, с повышенным содержанием глинозема. Для выполнения данных требований на АО «Уральская Сталь» колесные марки стали не раскисляют алюминием, а также избегают использования глиноземсодержащих материалов как при раскислении шлака и десульфурации металла в ковше, так и при выполнении футеровки сталеразливочных ковшей.

Физико-химические основы дегазации стали при вакуумировании изучены достаточно хорошо [3, 4, 10, 11], однако количественное влияние параметров вакуумирования определяется специфическими техническими и технологическими особенностями оборудования, свойствами стали и ее исходной газонасыщенностью. Поэтому в научно-технической литературе широко представлены результаты моделирования процессов дегазации [12–14], а также исследований результатов вакуумирования стали в различных производственных условиях: ПАО «ММК» [15], «ЕВРАЗ НТМК» [16, 17], ПАО «Северсталь» [18], «Уральская Сталь» [19–21], АО «Северский трубный завод» [22], Sheffield Forgemasters International Ltd. (Англия) [13], SSAB Oxelosund AB (Швеция) [23], Uddeholm AB (Швеция) [24], Hunedoara steel works (Румыния) [25, 26]. Анализ научно-технической литературы, посвященный данному вопросу, показал, что на результаты вакуумирования влияют не только технологические параметры обработки, но и большое число технологических и организационных факторов. Поэтому, несмотря на большой объем исследований поведения водорода и азота при вакуумировании, изучение результатов дегазации стали в конкретных производственных условиях позволяет получить новые закономерности и совершенствовать технологию производства. Так, применительно к условиям эксплуатации УВС на АО «Уральская Сталь» в широком доступе отсутствуют данные о результатах дегазации колесных марок сталей.

Целью исследования является уточнение закономерностей удаления водорода и азота из стали в процессе

вакуумной обработки в камерном вакууматоре, а также получение количественных зависимостей между результатами и параметрами вакуумирования, позволяющих оптимизировать технологию обработки стали на УВС.

Материал и методика исследования

Исследование проводили по производственным данным о результатах вакуумной обработки металла на УВС камерного типа SIEMENS-VAI вместимостью 120 т, эксплуатируемой с 2012 г. в электросталеплавильном цехе АО «Уральская Сталь».

В качестве исходных данных использовали отчетные показатели производства колесных марок стали за ноябрь — декабрь 2019 г. По действующей с 2019 г. технологии обработке на УВС подвергают сталь, выплавленную в гибкой модульной печи (ГМП) и обработанную на агрегате ковш-печь. ГМП обеспечивает возможность работы как в режиме дуговой печи, так и в режиме конвертера без использования электрической энергии, что позволяет проанализировать сравнительную эффективность производства стали в различных условиях ведения плавки. Всего за анализируемый период было проведено 2128 плавов, из которых 1118 — в режиме ДСП и 1010 — в режиме без использования электроэнергии.

Из всего объема анализируемых плавов на долю колесных марок стали 2 и Т приходится более 35 %. За исследуемый период было проведено 754 плавки сталей для железнодорожных колес (ГОСТ 10791–2011) массой более 80 тыс. т. Анализ данных провели для 551 плавки, выполненной с минимальными простоями и отклонениями от нормируемых параметров технологии.

Усредненные данные о технологических параметрах производства стального полупродукта в ГМП и вакуумной обработки колесных сталей приведены в **табл. 1 и 2**.

При выплавке стального полупродукта в ГМП, кроме обезуглероживания и нагрева металла, обеспечивается требуемая степень удаления фосфора в результате наведения высокоосновного шлака с повышенной окислительной способностью. Побочным эффектом является получение пониженного углерода в стальном полупродукте, что требует проведения науглероживания металла при ковшовой обработке.

Отличительной особенностью выплавки стали в режиме конвертерной плавки является более высокий расход жидкого чугуна и кислорода. При работе в таком режиме обеспечивается постоянное кипение ванны, что минимизирует азотирование металла и облегчает проведение последующей вакуумной обработки. Так, разница в содержании азота в полупродукте, полученном в различных режимах плавки, составляет 15–19 ppm, что при анализируемом объеме выборки является статистически значимым (по критерию Стьюдента). Поэтому при производстве стали с повышенными требованиями по содержанию азота целесообразно использовать режим выплавки стали без использования электроэнергии с повышенной долей жидкого чугуна, количество которого определяется тепловым балансом плавки.

Широкий диапазон по массе плавов (см. табл. 2) в анализируемом периоде объясняется организационно-техническими

Таблица 1
Параметры выплавки стального полупродукта в ГМП

Параметр	Величина параметра*				
	Сталь 2		Сталь Т		
Режим работы** / число плавов, ед.	ДСП / 263	КК / 144	ДСП / 86	КК / 58	
Длительность плавки, мин	37–82 62,27	32–87 65,85	22–81 61,98	44–84 68,43	
Длительность работы под током, мин	11–46 26,79	–	15–40 26,91	–	
Простои, мин	0–20 10,48	0–20 11,59	4–20 11,88	5–20 12,81	
Расход электроэнергии, кВт·ч/т	107,3–425,0 236,18	–	130,3–362,3 220,17	–	
Расход O ₂ , м ³ /т	23,7–166,2 63,97	38,47–119,2 74,62	44,1–107,5 63,21	43,5–119,6 78,14	
Масса металлошихты, т	100–155 129,1	93,5–179,1 131,56	105–176 131,79	82–166,4 130,79	
Расход жидкого чугуна, т	20–90 65,10	70–170 113,91	40–90 66,94	70–160 106,58	
Температура перед выпуском, °С	1600–1680 1650,7	1623–1675 1654,4	1636–1680 1654,6	1630–1670 1652,1	
Основность печного шлака, ед.	2,31–2,86 2,61	2,25–2,89 2,53	2,17–2,91 2,68	2,18–2,97 2,51	
Состав стального полупродукта, % (мас.)***	C	0,01–0,19 0,056	0,02–0,17 0,044	0,02–0,12 0,048	0,02–0,13 0,048
	P	0,001–0,018 0,0042	0,001–0,014 0,0057	0,001–0,012 0,0042	0,002–0,014 0,0053
	S	0,006–0,038 0,0176	0,005–0,043 0,0177	0,008–0,032 0,0175	0,004–0,038 0,0187
	N	0,009–0,011 0,0095	0,006–0,008 0,0076	0,008–0,011 0,0094	0,006–0,009 0,0079
	H ₂ , ppm	4,1–8,5 6,1	–	3,9–8,2 5,6	–

* В числителе — диапазон изменения, в знаменателе — среднее значение.
 ** Режим дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и режим кислородного конвертера (КК) без использования электрической энергии.
 *** Содержание кислорода в исследуемый период не определяли.

проблемами. В среднем массу плавки колесных сталей занижают от номинальной (120 т) для увеличения свободного борта, компенсируя интенсивное газовыделение при вакуум-углеродном раскислении. Толщину покровного слоя шлака в ковше при этом поддерживают на уровне 100 мм и определяют визуально.

Согласно данным вакуумирования (см. табл. 2), рабочие параметры вакуумирования изменяются в достаточно широких пределах, что вызывает значительные колебания содержания водорода и азота в стали после дегазации. На результаты вакуумирования также влияет газонасыщенность стали перед обработкой. Если насыщение металла водородом не зависит от режима проведения плавки стали, то содержание азота в печной пробе определяется режимом работы ГМП.

В результате вакуумной обработки в подавляющем большинстве случаев достигается снижение содержания водорода и азота до требуемых значений [23–25]. На рис. 1 и 2 приведены частотные диаграммы распределения содержания водорода и азота по анализируемым маркам стали. Как видно из рис. 1, у более 90 % плавов содержание водорода в стали находится ниже 1,6 ppm, что свидетельствует о

Таблица 2
Технологические параметры и результаты вакуумирования стали

Параметр	Величина параметра* при обработке стали			
	Сталь 2		Сталь Т	
Режим выплавки полупродукта**	ДСП	КК	ДСП	КК
Масса плавки, т	82,0–141,6 109,0	74,5–119,2 105,7	83,5–136,6 109,2	86,8–129,0 108,0
Длительность обработки на УВС, мин	32,0–84,0 51,4	23,0–78,0 52,6	41,0–91,0 56,4	31,0–71,0 55,9
Время обработки при глубоком вакууме (менее 0,5 кПа), мин	10,0–33,0 22,1	10,0–35,0 23,2	15,0–30,0 21,0	11,0–30,0 22,0
Минимальное давление в вакуумкамере, мбар	0,40–3,30 0,62	0,45–6,20 1,35	0,50–2,60 1,05	0,44–3,80 1,10
Расход аргона, м ³ /т	0,022–0,175 0,080	0,025–0,167 0,089	0,036–0,173 0,093	0,044–0,184 0,110
Температура перегрева в начале обработки, °С	76–142 112	82–142 116	94–143 115	94–175 122
Уровень шлака в ковше***, мм	101,9	99,3	100	100
Свободный борт, мм	500–950 559,6	350–950 577,7	500–800 561,0	500–800 579,3
Содержание [N] после обработки, % (мас.)	0,004–0,008 0,0062	0,004–0,008 0,0060	0,005–0,008 0,0065	0,005–0,008 0,0062
Содержание [H] после обработки, ppm	0,70–2,00 1,24	0,70–2,00 1,22	0,90–2,00 1,28	0,90–1,80 1,24

* В числителе — диапазон изменения, в знаменателе — среднее значение.
 ** Режим дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и режим кислородного конвертера (КК) без использования электрической энергии.
 *** Уровень шлака в ковше определяли визуально.

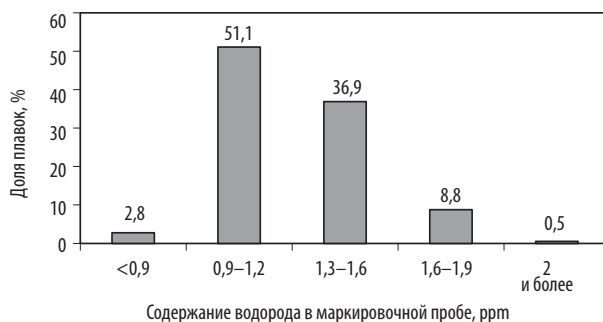


Рис. 1. Частота распределения содержания водорода



Рис. 2. Частота распределения содержания азота

нерациональном режиме вакуумирования, приводящем к увеличению энергетических затрат на передел. Аналогичная ситуация складывается и по азоту: на более чем 67 % плавков содержание азота составляет 0,006 % и менее. При этом в более чем 9 % случаев содержание азота находится на верхнем допустимом пределе (0,008 %) или превышает его.

Таким образом, в большинстве плавков содержания водорода и азота существенно меньше регламентированных, что приводит к увеличению затрат на вакуумную обработку [27, 28]. Поэтому для снижения издержек производства актуальной задачей является совершенствование технологии вакуумирования стали исходя из текущих условий производства.

Результаты исследования и их обсуждение

Детальное изучение закономерностей вакуумирования проводили по данным производства стали марки 2 (наиболее массовой), выплавляемой в режиме конвертерной плавки, который обеспечивает минимальное азотирование металла.

Для изучаемой УВС к основным технологическим параметрам, определяющим результаты дегазации, относят глубину и продолжительность вакуумирования, расход аргона, температуру металла, толщину слоя шлака и величину свободного борта. При этом по сложившейся практике эксплуатации УВС на АО «Уральская Сталь» толщину слоя шлака устойчиво поддерживают на уровне 100 мм, а величина свободного борта в более 90 % случаев составляет 500–600 мм. Поэтому для дальнейшей обработки от первоначальных производственных данных был выполнен отсев плавков с величиной свободного борта вне основного диапазона в 500–600 мм, а влияние толщины слоя шлака, оцениваемое визуально, не учитывали.

Для наглядного представления влияния технологических параметров вакуумирования на остаточное содержание водорода и азота в стали построены трехмерные зависимости:

- зависимости [H] и [N] от давления в вакуумной камере (ВК) и продолжительности вакуумирования (рис. 3) при перегреве металла в диапазоне 100–130 °С;

- зависимости [H] и [N] от давления в вакуумной камере и перегреве металла (рис. 4) при продолжительности вакуумирования 15–25 мин;

- зависимости [H] и [N] от давления в вакуумной камере и расхода аргона (рис. 5) при продолжительности вакуумирования 15–25 мин.

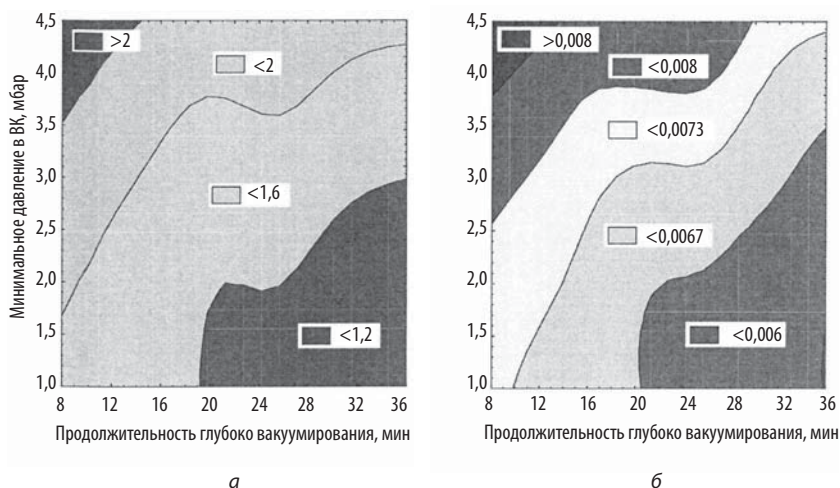


Рис. 3. Зависимость остаточного содержания водорода, ppm (а); азота, % (мас.) (б) от давления в вакуумной камере и продолжительности глубокого вакуумирования при перегреве металла в диапазоне 100–130 °С

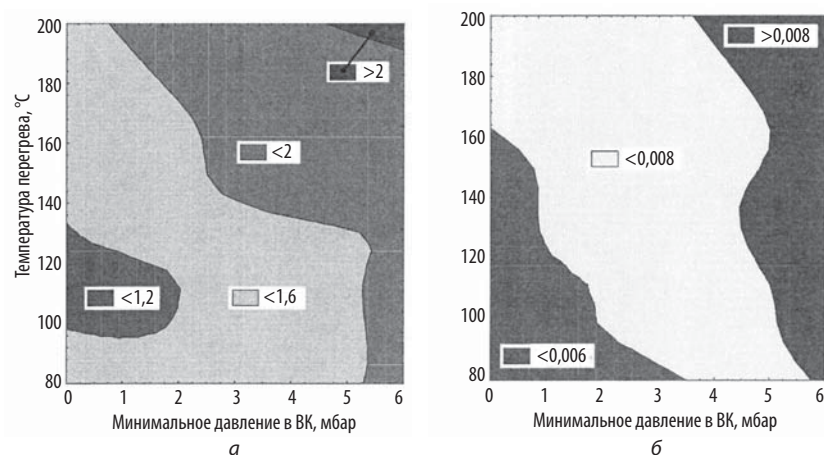


Рис. 4. Зависимость остаточного содержания водорода, ppm (а); азота, % (мас.) (б) от давления в вакуумной камере и перегрева металла при продолжительности вакуумирования 15–25 мин

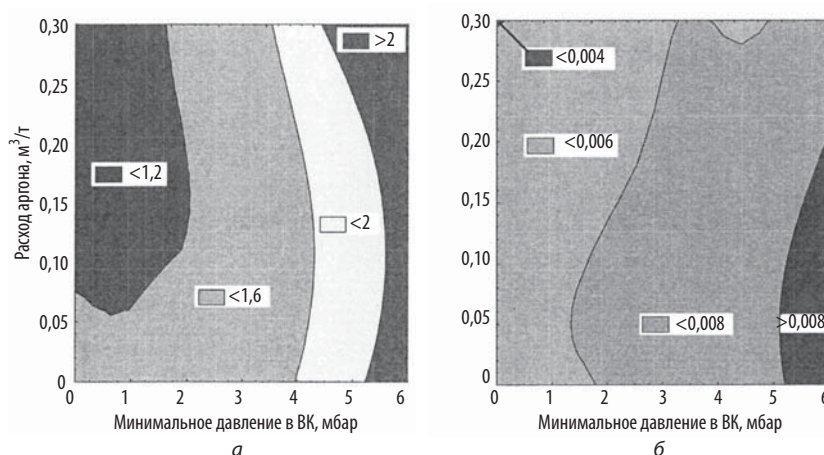


Рис. 5. Зависимость остаточного содержания водорода, ppm (а); азота, % (мас.) (б) от давления в вакуумной камере (ВК) и расхода аргона при продолжительности глубокого вакуумирования 15–25 мин

Для минимизации влияния исходной газонасыщенности стали диаграммы (см. рис. 3–5) строили по данным плавков с содержанием в печной пробе водорода 5–7 ppm и азота 0,0075–0,0085 % (мас.). Из представленных на рис. 3–5 диаграмм следует, что для гарантированного получения содержания водорода менее 1,5 ppm и азота до 0,007 % (мас.) необходимо проводить вакуумную обработку стали при следующих параметрах:

- остаточное давление в вакуум-камере до 3 мбар;
- продолжительность обработки при глубоком вакууме не менее 20 мин;
- расход аргона на продувку не менее 0,05 м³/т;
- перегрев металла от 110 до 130 °С.

Выявленный рациональный диапазон перегрева стали перед началом вакуумирования обеспечивает оптимальные температурные условия разлива стали. Так, при общей продолжительности вакуумной обработки 50–55 мин потери температуры металла составляют 70–75 °С. Тогда при оптимальном перегреве металла в сталеразливочном ковше перед началом разлива 35–45 °С и потерях температуры металла при транспортировке от УВС до разлива 5–10 °С (до 15 мин) оптимальная температура перегрева металла в начале обработки на УВС составит ~115–125 °С, что соответствует оптимальным условиям дегазации стали при вакуумировании.

Для количественной оценки совместного влияния параметров вакуумирования на остаточное содержание водорода ([H], ppm) и азота ([N], % (мас.)) был проведен регрессионный анализ производственных данных и получены уравнения:

$$[H] = 0,616 - 0,0101 \cdot \tau_B + 9,8 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_B^2 + 0,1 \cdot p_{\min} - 0,011 \cdot p_{\min}^2 + 0,0087 \cdot t_{\text{пер}} - 1,6 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{пер}}^2 - 0,141 \cdot v_{\text{ар}}$$

$$R = 0,69, F = 8,88;$$

$$[N] = 0,0023 - 7,2 \cdot 10^{-5} \cdot \tau_B + 2,56 \cdot 10^{-7} \cdot \tau_B^2 + 6,06 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\min} + 4,62 \cdot 10^{-5} \cdot p_{\min}^2 + 7,78 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{пер}} - 2,8 \cdot 10^{-5} \cdot t_{\text{пер}}^2 - 0,0025 \cdot v_{\text{ар}}$$

$$R = 0,55, F = 12,09,$$

где τ_B — длительность глубокого вакуумирования на УВС, мин; p_{\min} — минимальное давление в вакуум-камере, мбар; $t_{\text{пер}}$ — температура перегрева на УВС, °С; $v_{\text{ар}}$ — расход аргона, м³/т.

Сравнение расчетных значений критериев Фишера с табличным ($F_{0,99} = 2,67$) свидетельствует о значимости уравнений регрессии и надежности коэффициентов корреляции.

Полученные уравнения регрессии позволяют прогнозировать остаточное содержание водорода и азота при текущих параметрах вакуумирования (в исследуемом диапазоне их варьирования) для условий эксплуатации УВС АО «Уральская Сталь», а также количественно оценить степень влияния каждого технологического параметра (при постоянстве других факторов) на остаточное содержание водорода и азота в стали. Текущие и рациональные (по технологическим критериям) параметры вакуумирования, а также результаты дегазации представлены в **табл. 3**.

Таблица 3

Текущие и рациональные параметры и результаты вакуумирования в условиях АО «Уральская Сталь»

Параметры вакуумирования	Значения параметров	
	Текущие	Рациональные
Длительность обработки на УВС, мин	52,6	45,0
Длительность глубокого вакуумирования на УВС, мин	22,93	15,00
Минимальное давление в вакуумкамере, мбар	1,35	3,00
Температура перегрева на УВС, °С	116	120
Расход аргона, м ³ /т	0,089	0,050
Содержание азота, % (мас.)	0,006	0,007
Содержание водорода, ppm	1,22	1,45

В настоящее время разработанные рекомендации проходят промышленное апробирование, по завершении которого будет возможно определение экономического эффекта. По предварительным оценкам, в результате снижения продолжительности вакуумной обработки можно ожидать снижения производственных издержек не менее чем на 0,1 %.

Таким образом, подбирая параметры вакуумирования с учетом технологических возможностей и рациональных уровней, можно прогнозировать уровень содержания водорода в стали по полученным ранее уравнениям регрессии, а также определять рациональное сочетание параметров обработки для получения требуемой глубины удаления водорода и азота.

Заключение

Определены основные параметры вакуумирования стали, определяющие эффективность удаления водорода и азота из колесных марок сталей в камерном вакууматоре, эксплуатируемом в условиях ЭСПЦ АО «Уральская Сталь».

Выявлено количественное влияние параметров вакуумирования (уровень остаточного давления и продолжительность глубокого вакуумирования, температура перегрева металла и расход аргона), позволяющее прогнозировать его результаты, а также подбирать величины параметров с целью достижения заданного содержания водорода и азота в колесной стали.

Определены рациональные уровни параметров вакуумирования, гарантированно обеспечивающие получение стали с содержанием водорода до 2 ppm и азота до 0,008 % (мас.). Разработанные технологические рекомендации проходят промышленное апробирование. ЧМ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № FZRU-2020-0011).

Библиографический список

1. ГОСТ 10791–2011. Колеса цельнокатаные. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2011. — 32 с.
2. Кудрин В. А. Теория и технология производства стали: учебник для вузов. — М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. — 528 с.
3. Поволоцкий Д. Я., Кудрин В. А., Вишкарев А. Ф. Внепечная обработка стали: учебник для вузов. — М.: МИСиС, 1995. — 256 с.

4. Морозов А. Н., Стрекаловский М. М., Чернов Г. И., Кацнельсон Я. Е. Внепечное вакуумирование стали. — М.: Metallurgy, 1975. — 288 с.
5. Бровман М. Я. Непрерывная разливка металлов. — М.: ЭКОМЕТ, 2007. — 484 с.
6. Паршин В. М., Буланов Л. В. Непрерывная разливка стали. — Липецк: ОАО «НЛМК», 2011. — 221 с.
7. Pan H. Control Technology of Internal Quality for CC Billet // *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 415-417. P. 1729–1734.
8. Шевченко Е. А., Столяров А. М., Шаповалов А. Н., Баранчиков К. В. Изучение искажения поперечного сечения непрерывнолитого сляба // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2014. № 1. С. 34–37.
9. Yu S., Miettinen J., Shao L., Louhenkilpi S. Mathematical Modeling of Nitrogen Removal from the Vacuum Tank Degasser // *Steel Research International*. 2015. Vol. 86, Iss. 5. P. 466–477.
10. Fruehan R. J. Fundamentals and Practice for Producing Low Nitrogen Steels // *ISIJ International*. 1996. Vol. 36. P. S58–S61.
11. Кнюппель Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Ч. 1. Термодинамические и кинетические закономерности: пер. с нем. — М.: Metallurgy, 1973. — 312 с.
12. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Modeling Study of Nitrogen Removal from the Vacuum Tank Degasser // *Steel Research International*. 2014. Vol. 85, Iss. 9. P. 1393–1402.
13. Karouni F., Wynne B. P., Talamantes-Silva J., Phillips S. Modeling the Effect of Plug Positions and Ladle Aspect Ratio on Hydrogen Removal in the Vacuum Arc Degasser // *Steel Research International*. 2018. Vol. 89, Iss. 5. P. 1700551.
14. 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.
15. Николаев А. О., Бигеев В. А., Николаев О. А., Чигасов Д. К. Особенности вакуумирования трубных марок стали в условиях ККЦ ОАО «ММК» // *Электрометаллургия*. 2013. № 4. С. 19–24.
16. Кушнарев А. В. Повышение качества непрерывнолитого слитка из колесной стали в ОАО «ЕВРАЗ НТМК» // *Черные металлы*. 2014. № 3 (987). С. 28–32.
17. Кушнарев А. В., Бозатов А. А., Киричков А. А., Пузырев С. С. Развитие технологии производства железнодорожных колес // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2016. Т. 14. № 1. С. 59–68.
18. Зинченко С. Д., Филатов М. В., Ефимов С. В., Дуб А. В., Гошкадера С. В. Технологические аспекты удаления водорода с использованием установки ковшевого вакуумирования стали // *Металлург*. 2004. № 11. С. 41–42.
19. Тутарова В. Д., Шаповалов А. Н., Калитаев А. Н. Закономерности удаления водорода на установке вакуумирования стали камерного типа // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2017. Том 60. № 3. С. 192–199.
20. Tutarova V. D., Shapovalov A. N., Kalitaev A. N. Objective Laws of Nitrogen Removal in the Vacuum Tank Degasser // *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. P. 381–387.
21. Smirnova E. A., Eliseeva I. A., Shapovalov A. N. The Degassing Laws for Railway Wheel Steel in a Vacuum Tank Degasser // *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. P. 269–274.
22. Житлухин Е. Г., Мелинг В. В., Дресвянкина Л. Е., Гудов А. Г., Степанов И. А. Освоение и повышение эффективности технологии вакуумирования стали // *Сталь*. 2014. № 6. С. 12–14.
23. Jauhainen A., Jonsson L., Jönsson P., Eriksson S. The influence of stirring method on hydrogen removal during ladle treatment // *Steel Research*. 2002. Vol. 73, Iss. 3. P. 82–90.
24. 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, Iss. 3. P. 199–205.
25. Socalici A., Popa E., Heput T., Dragoi F. Researches Regarding the Improvement of the Steel Quality // *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 216. P. 273–278.
26. Ardelean E., Heput T., Vătăşescu M., Crişan 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.
27. Бурман В., Давене Ж. Структура затрат на вакуумирование стали с учетом обработки в агрегате ковш-печь // *Черные металлы*. 2012. № 11. С. 41–49.
28. Баскакова Н. Т., Песин И. А. Концептуальные подходы в оптимизационном планировании ремонтов оборудования на металлургическом предприятии // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2013. Т. 41. № 1. С. 93–96.

“Chernye metally”, 2021, No. 11, pp. 30–36

DOI: 10.17580/chm.2021.12.06

Improvement of the technology for railway wheel steel vacuum processing

Information about authors

A. N. Shapovalov, Cand. Eng., Professor, Head of the Dept. of Metallurgical Technologies and Equipment¹;

S. P. Nefedyev, Cand. Eng., Senior Researcher, Research and Innovation Sector²;

S. I. Platov, Dr. Eng., Professor, Head of the Dept. of Machines and Technologies for Metal Forming and Mechanical Engineering²;

M. V. Kharchenko, Cand. Eng., Associate Professor², e-mail: kharchenko.mv@bk.ru

¹ Novotroitsk branch of NUST MISIS (Novotroitsk, Russia).

² Nosov Magnitogorsk State Technical University (Magnitogorsk, Russia)

Abstract: The analysis of data on the production of wheel steel grades “2” and “T” according to GOST 10791-2011 in the conditions of the electric furnace shop of Ural Steel JSC is presented. The content of hydrogen and nitrogen is significantly less than the regulated ones on most heats, which indicates an irrational vacuum mode. Such modes lead to an increase in energy costs for redistribution. All this testifies to the available reserves for improving the vacuum technology. As a result of research, it has been determined that in order to guarantee the production of hydrogen content less than 1.5 ppm and nitrogen up to 0.007 %, it is necessary to carry out vacuum treatment of steel at a residual pressure in a vacuum chamber of up to 3 mbar, the duration of processing in a high vacuum is at least 20 minutes, and argon consumption is blowdown not less than 0.05 m³/t, metal overheating from 110 to 130 °C. The overheating range of the steel before the start of the vacuum treatment the optimal temperature conditions for casting the steel. The optimum temperature of metal overheating at the beginning of processing on steel degassing installation is ~ 115-125 °C with a duration of vacuum treatment of 50-55 minutes (loss of metal temperature 70-75 °C), with overheating of the metal in a steel-pouring ladle before the start of casting 35-45 °C and at loss of metal temperature during transportation to casting 5 °C (15 min). Regression equations are obtained that allow predicting the results of degassing, as well as selecting the values of the vacuum treatment

parameters in order to achieve a given content of dissolved gases – hydrogen ([H], ppm) and nitrogen ([N], %).

Key words: vacuum treatment, vacuum tank degasser, railway wheel steel, duration of deep vacuum, vacuum chamber pressure, metal overheating temperature, argon consumption.

The research was conducted under financial support of the RF Ministry on Science and Higher Education (PROJECT No. FZR-2020-0011).

References

1. GOST 10791–2011. All-rolled wheels. Specifications. Moscow: Standartinform. 2011. 32 p.
2. Kudrin V. A. Theory and technology of steel production: Textbook for universities. Moscow: Mir, Izdatelstvo AST. 2003. 528 p.
3. Povolotskiy D. Ya., Kudrin V. A., Vishkarev A. F. Ladle furnace steel processing: Textbook for universities. Moscow: MISIS. 1995. 256 p.
4. Morozov A. N., Strekalovskiy M. M., Chernov G. I., Katsnelson Ya. E. Ladle furnace degassing of steel. Moscow: Metallurgiya. 1975. 288 p.
5. Brovman M. Ya. Continuous casting of metals. Moscow: EKOMET. 2007. 484 p.
6. Parshin V. M., Bulanov L. V. Continuous casting of steel. Lipetsk: PJSC NLMK. 2011. 221 p.
7. Pan H. Control Technology of Internal Quality for CC Billet. *Advanced Materials Research*. 2012. Vol. 415–417. P. 1729–1734.
8. Shevchenko E. A., Stolyarov A. M., Shapovalov A. N., Baranchikov K. V. Study of the cross-section distortion of a continuously cast slab. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2014. No. 1. Pp. 34–37.
9. Yu S., Miettinen J., Shao L., Louhenkilpi S. Mathematical Modeling of Nitrogen Removal from the Vacuum Tank Degasser. *Steel Research International*. 2015. Vol. 86, Iss. 5. Pp. 466–477.
10. Fruehan R. J. Fundamentals and Practice for Producing Low Nitrogen Steels. *ISIJ International*. 1996. Vol. 36. Pp. S58–S61.
11. Knupe H. Deoxidation and Vacuum Processing of Steel Melts. Vol. 1. Thermodynamic and Kinetic Basics: Translated from German. Moscow: Metallurgiya. 1973. 312 p.
12. Yu S., Miettinen J., Louhenkilpi S. Modeling Study of Nitrogen Removal from the Vacuum Tank Degasser. *Steel Research International*. 2014. Vol. 85, Iss. 9. Pp. 1393–1402.

13. Karouni F., Wynne B. P., Talamantes-Silva J., Phillips S. Modeling the Effect of Plug Positions and Ladle Aspect Ratio on Hydrogen Removal in the Vacuum Arc Degasser. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89. Iss. 5. p. 1700551.
14. 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.
15. Nikolaev A. O., Bigeev V. A., Nikolaev O. A., Chigasov D. K. Features of degassing of pipe steel grades in conditions of the OCS of OJSC MMK. *Elektrometallurgiya*. 2013. No. 4. pp. 19–24.
16. Kushnarev A. V. Quality improvement of continuously cast billets of wheel steel manufactured at JSC "EVRAZ NTMK". *Chernye Metally*. 2014. No. 3. pp. 28–32.
17. Kushnarev A. V., Bogatov A. A., Kirichkov A. A., Puzyrev S. S. Development of the technology for production of railway wheels. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2016. Vol. 14. No. 1. pp. 59–68.
18. Zinchenko S. D., Filatov M. V., Efimov S. V., Dub A. V., Goshkaderya S. V. Technological aspects of hydrogen removal using a ladle steel vacuuming unit. *Metallurg*. 2004. No. 11. pp. 41–42.
19. Tutarova V. D., Shapovalov A. N., Kalitaev A. N. Regularities of hydrogen removal in a chamber-type steel degassing unit. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*. 2017. Vol. 60. No. 3. pp. 192–199.
20. Tutarova V. D., Shapovalov A. N., Kalitaev A. N. Objective Laws of Nitrogen Removal in the Vacuum Tank Degasser. *Materials Science Forum*. 2020. Vol. 989. pp. 381–387.
21. Smirnova E. A., Eliseeva I. A., Shapovalov A. N. The Degassing Laws for Railway Wheel Steel in a Vacuum Tank Degasser. *Defect and Diffusion Forum*. 2021. Vol. 410. pp. 269–274.
22. Zhitlukhin E. G., Meling V. V., Dresvyankina L. E., Gudov A. G., Stepanov I. A. Mastering and increasing the efficiency of steel degassing technology. *Stal*. 2014. No. 6. pp. 12–14.
23. Jauhiainen A., Jonsson L., Jönsson P., Eriksson S. The influence of stirring method on hydrogen removal during ladle treatment. *Steel Research*. 2002. Vol. 73. Iss. 3. pp. 82–90.
24. Steneholm K., Andersson M., Tillander A., Jönsson P. G. Removal of hydrogen, nitrogen and sulphur from tool steel during vacuum degassing. *Ironmaking & Steelmaking*. 2013. Vol. 40. Iss. 3. pp. 199–205.
25. Socalici A., Popa E., Heput T., Dragoi F. Researches Regarding the Improvement of the Steel Quality. *Solid State Phenomena*. 2014. Vol. 216. pp. 273–278.
26. Ardelean E., Heput T., Vătăşescu M., Crişan 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.
27. Burgmann W., Davene J. The cost structure of vacuum steel degassing including ladle furnace treatment. *Chernye Metally*. 2012. No. 11. pp. 41–49.
28. Baskakova N. T., Pesin I. A. Conceptual approaches in the optimization planning of equipment repairs at a metallurgical enterprise. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni G. I. Nosova*. 2013. Vol. 41. No. 1. pp. 93–96.

УДК 669.046.558.3

Влияние обработки расплава проволокой с Са- и Ва-наполнителем на фазовый состав и загрязненность неметаллическими включениями при внепечной обработке и разливке стали 26ХМФБА

А. Ю. Агарков, аспирант кафедры технологии материалов¹

Д. В. Руцкий, исполняющий обязанности заведующего кафедрой технологии материалов¹, доцент, канд. техн. наук, эл. почта: tecmat@vstu.ru

Н. А. Зюбан, профессор кафедры технологии материалов¹, докт. техн. наук

Г. В. Бабин, аспирант кафедры технологии материалов¹

¹ ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия.

Повышение требований, предъявляемых заказчиком к качеству металла обсадных труб, обуславливает поиск новых технологических решений, позволяющих обеспечить стабильный уровень прочностных и коррозионностойких свойств получаемых заготовок. Одним из основных факторов, влияющих на качество металла обсадных труб (прочностные свойства и коррозионная стойкость), является металлургическая наследственность, а именно: загрязненность стали неметаллическими включениями. В настоящее время для снижения негативного влияния включений на качество стали эффективно применяют методы внепечной обработки при атмосферном и пониженном давлении, а также методы модифицирования жидкой стали щелочноземельными металлами. В работе приведены результаты исследования, показывающие влияние лигатуры, содержащей кальций (СКЗ0_{пров}) и барий (СКБа15Р_{пров}), на фазовый состав и загрязненность неметаллическими включениями при внепечной обработке и разливке (печь-ковш → вакууматор → непрерывная разливка) стали 26ХМФБА. Показано, что использование СКЗ0_{пров} после вакуумирования приводит к неполной модификации алюминатных включений. Последовательная обработка СКБа15Р_{пров} и СКЗ0_{пров} после вакуумирования приводит к максимальному снижению алюминатных включений. Наличие легкоплавких включений (12СаО·7Аl₂О₃) более предпочтительно, так как данный тип включений не откладывается на стенках разливочного стакана и не оказывает отрицательного воздействия на разливаемость стали.

Ключевые слова: внепечная обработка, вакуумирование, непрерывная разливка, неметаллические включения, модифицирование, силикаты, алюминаты кальция.

DOI: 10.17580/chm.2021.12.07

Введение

В настоящее время актуальной задачей современного отечественного топливно-энергетического комплекса является увеличение эксплуатационных характеристик нефте- и газопромышленных труб, значительно повышающее эффективность

добычи, а также стабильность экологической обстановки в нефтедобывающих регионах РФ.

Из-за интенсивных эксплуатационных нагрузок сталь должна обладать комплексом механических свойств, гарантирующих высокие показатели надежности и прочности