

Оригинальная статья

УДК 669.187.4

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-2(52)-52-61

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫПЛАВКИ СТАЛИ НА СТОЙКОСТЬ
ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ**

© 2025 г. Е. В. Женин, А. Н. Шаповалов

Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС» (Россия, 462359, Оренбургская обл., Новотроицк, ул. Фрунзе, 8)

Аннотация. Одним из направлений повышения эффективности сталеплавильного производства является увеличение срока службы огнеупорной футеровки. Стойкость футеровки определяется составом и свойствами огнеупоров, условиями ее выполнения и последующей эксплуатацией. Изучено влияние параметров выплавки стали на стойкость огнеупорной футеровки гибких модульных печей (ГМП), эксплуатируемых в условиях электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ) АО «Уральская Сталь» с 2019 г. Особенностью ГМП является возможность работы как в режиме дуговой сталеплавильной печи (ДСП), так и в режиме без использования электрической энергии, то есть по технологии конвертерной плавки с повышенной долей чугуна. Стойкость футеровки ГМП за исследуемые кампании изменялась в широких пределах от 270 до 450 плавов при среднем значении в 328 плавов. Приведены результаты исследования влияния основных технологических параметров выплавки стали в гибкой модульной печи на стойкость футеровки стен и подины. Показано, что основными технологическими факторами, определяющими стойкость футеровки и длительность кампании ГМП, являются продолжительность простоев (межплавочных периодов), окисленность шлака и содержание в нем оксида MgO. Получены количественные зависимости влияния исследуемых технологических параметров плавки на стойкость огнеупорной футеровки. Разработаны технологические рекомендации, позволяющие продлить срок службы огнеупорной футеровки: снижение продолжительность межплавочных периодов, уменьшение переокисления металла и шлака в результате остановки продувки при заданном содержании углерода (в соответствии с выплавляемой маркой стали), повышение содержания оксида MgO в шлаке до 8 – 10 %. Выполнение технологических рекомендаций позволит увеличить стойкость огнеупорной футеровки минимум на 25 % с соответствующим снижением расходов на огнеупоры и ремонты.

Ключевые слова: сталеплавильное производство, гибкая модульная печь, огнеупорная футеровка, стойкость футеровки, межплавочные простои, окисленность шлака

Для цитирования: Женин Е.В., Шаповалов А.Н. Влияние параметров выплавки стали на стойкость огнеупорной футеровки. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;2(52):52–61. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-52-61](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-52-61)

Original article

**INFLUENCE OF STEELMAKING PARAMETERS ON THE REFRACTORY
LINING LIFE**

© 2025 E. V. Zhenin, A. N. Shapovalov

Novotroitsk branch of NUST MISIS (8 Frunze Str., Novotroitsk, Orenburg Region, 462359, Russian Federation)

Abstract. One of the ways to increase the efficiency of steelmaking is to increase the service life of refractory lining. The durability of the lining is determined by the composition and properties of the refractories, the conditions of its execution and subsequent operation. The influence of steel smelting parameters on the resistance of the refractory lining of flexible modular furnaces (GMP) operated in the conditions of the Ural Steel electric steelmaking plant (ESPC) since 2019 has been studied. A special feature of the GMP is the ability to operate both in the mode of an arc steelmaking furnace (chipboard) and in a mode without the use of electric energy, that is, using converter melting technology with an increased proportion of cast iron. The durability of the GMP lining during the studied campaigns varied widely from 270 to 450 heats, with an average of 328 heats. The

results of a study of the influence of the main technological parameters of steel smelting in a flexible modular furnace on the stability of the lining of walls and hearths are presented. It is shown that the main technological factors determining the durability of the lining and the duration of the GMP campaign are the duration of downtime (inter-melting periods), the oxidation of slag and the content of MgO oxide in it. Quantitative dependences of the influence of the studied technological parameters of melting on the resistance of the refractory lining are obtained. Technological recommendations have been developed to extend the service life of the refractory lining: reducing the duration of inter-melting periods, reducing overoxidation of metal and slag as a result of stopping purging at a given carbon content (in accordance with the grade of steel being smelted), increasing the content of MgO oxide in the slag to 8 – 10 %. The implementation of technological recommendations will increase the resistance of refractory lining by at least 25 % with a corresponding reduction in costs for refractories and repairs.

Keywords: steelmaking, flexible modular furnace, refractory lining, lining life, intermelting downtime, slag oxidation

For citation: Zhenin E.V., Shapovalov A.N. Influence of steelmaking parameters on the refractory lining life. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;2(52):52–61. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2\(52\)-52-61](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-2(52)-52-61)

Введение

Одним из направлений повышения эффективности сталеплавильного производства является увеличение срока службы огнеупорной футеровки. Стойкость футеровки определяется составом и свойствами огнеупоров [1 – 5], условиями ее выполнения и последующей эксплуатацией [6 – 8]. Учитывая большое количество факторов, влияющих на срок службы футеровки, продолжительность межремонтного периода сталеплавильного агрегата может изменяться в широких пределах. Это осложняет планирование ремонтов, увеличивает простои и снижает производительность. Поэтому прогнозирование стойкости футеровки сталеплавильного агрегата является актуальной производственной задачей, решаемой индивидуально в каждом конкретном случае. Настоящая работа посвящена изучению влияния параметров выплавки стали на стойкость огнеупорной футеровки гибких модульных печей (ГМП), эксплуатируемых в условиях электросталеплавильного цеха (ЭСЦ) АО «Уральская Сталь» с 2019 г. [9; 10].

Исходные данные

Поставленную в работе задачу решали на основе статистического анализа производственных данных по 21-й кампании гибких модульных печей. В исследуемом периоде футеровку ГМП (рабочая футеровка подины и стен) выполняли по стандартной технологии из идентичных огнеупоров на основе периклаза. Это позволило исключить влияние эксплуатационных свойств огнеупоров на износ футеровки. Учитывая имеющиеся литературные данные о влиянии технологических факторов на условия службы и стойкость футеровки сталеплавильных агрегатов [6 – 8; 11 – 14], основное внимание в настоящей работе уделили изучению влияния состава шихты, продолжительности плавки и параметрам

шлакового режима. Усредненные технологические величины производства стали в ГМП, а также данные о стойкости футеровки за исследуемые кампании представлены в таблице.

Особенностью рассматриваемой печи является возможность работы как в режиме дуговой сталеплавильной печи (ДСП), так и в режиме без использования электрической энергии, то есть по технологии конвертерной плавки с повышенной долей чугуна. В рассматриваемые кампании долю технологии ДСП изменяли от 0 до 100 % (при среднем значении 72,3 %). Несмотря на различия в составе шихты и тепловых балансах в рассматриваемых режимах работы ГМП, плавку проводили при высокой доле жидкого чугуна при интенсивном окислительном рафинировании с получением низкоуглеродистого полупродукта (вне зависимости от марки выплавляемой стали) [15 – 17]. Такая особенность технологии связана с задачей по удалению фосфора до уровня 0,005 – 0,010 %, что возможно только при условии формирования высокоосновного окислительного шлака. Учитывая скоротечность процесса такой шлак формируется в конце плавки при низком остаточном содержании углерода. Поэтому единственным отличием технологии выплавки полупродукта является содержание жидкого чугуна в металлошихте, которое изменяется от 40 – 60 (для ДСП) до 90 – 95 % (для кислородного конвертера).

Стойкость футеровки ГМП за исследуемые кампании в среднем составила 328 плавов. При этом в зависимости от условий эксплуатации продолжительность кампании ГМП изменялась в широких пределах (от 270 до 450 плавов). Такая вариативность во многом обусловлена изменениями технологических параметров плавки (см. таблицу), что позволяет изучить их влияние.

Усредненные показатели работы ГМП**Average results of FMF operation**

Параметр	Значение параметра	
	Диапазон	Среднее
Доля ДСП технологии, %	0 – 100	72,3
Длительность плавки, мин	72 – 100	81,5
Длительность простоев, мин	13,9 – 43,0	24,4
Доля жидкого чугуна в металлошихте, %	54,3 – 124,4	77,6
Стойкость футеровки, плавов	270 – 450	327,5
Состав полупродукта перед выпуском, %:		
C	0,043 – 0,058	0,051
Mn	0,027 – 0,062	0,045
P	0,004 – 0,006	0,005
S	0,014 – 0,026	0,021
Состав печного шлака перед выпуском, %:		
CaO	34,22 – 43,50	38,08
SiO ₂	12,59 – 17,15	14,18
FeO	17,27 – 40,15	27,63
MnO	2,17 – 5,15	3,31
MgO	3,68 – 7,82	5,71
Al ₂ O ₃	1,43 – 4,52	2,60
Основность шлака CaO/SiO ₂ , ед.	2,49 – 2,98	2,69
Температура полупродукта перед выпуском, °C	1653 – 1663	1658

Результаты анализа производственных данных и их обсуждение*Режим работы ГМП и доля жидкого чугуна*

За исследуемые кампании ГМП работали с различным сочетанием режимов при расходе жидкого чугуна от 54 до 124 т на плавку. Из теории сталеплавильных процессов известно, что с увеличением в составе металлошихты доли чугуна, являющегося основным источником кремнезема в шлаке, условия службы основной футеровки ухудшаются [11 – 13]. Однако для рассматриваемых условий влияние режима ведения плавки и содержания жидкого чугуна в составе металлошихты отсутствует (рис. 1). Выявленная особенность связана с преимущественным удалением кремнезема, образующегося при окислении кремния чугуна, с первичным шлаком, что минимизирует отрицательное влияние этого фактора на стойкость огнеупорной футеровки.

Продолжительности плавки и межплавочных простоев

Повышение продолжительности плавки способствует снижению стойкости огнеупорной футеровки вследствие увеличения длительности теплового, химического и механического воздействий на футеровку. При этом в рассматриваемых кампаниях длительность плавки без простоев изменяли незначительно (в пределах 50 – 60 мин), а основное негативное воздействие на условия службы футеровки оказывали про-

стои, связанные с логистическими и техническими проблемами. Влияние продолжительности простоев на стойкость огнеупорной футеровки представлено на рис. 2.

Увеличение межплавочных простоев существенно сокращают стойкость огнеупорной футеровки. Такое влияние объясняется увеличением колебаний температуры за цикл плавки. Это приводит к появлению в футеровке термических напряжений [18 – 21] как в процессе ее охлаждения, так и при дальнейшем разогреве в начале следующей плавки. Результатом температурных колебаний является зарождение, расширение и рост существующих трещин в огнеупорной кладке. На углах и краях огнеупора появляются сколы, а новые трещины образуются из-за теплового удара и быстрого расширения огнеупора. Таким образом, снижение стабильности в работе печи, выражающееся в увеличении межплавочных простоев, ухудшает условия эксплуатации футеровки и снижает ее стойкость.

Влияние основности шлака

Основность шлака (CaO/SiO₂) практически не влияет на стойкость огнеупорной футеровки (рис. 3). Это связано со стабильным поддержанием уровня основности (более 2,4 ед.), что минимизирует разрушающее действие кремнезема на футеровку. При относительно стабильной технологии наведения шлака изменение его основности в диапазоне 2,4 – 3,0 ед. за исследуемые кампании печи практически не оказывает влияние на стойкость футеровки.

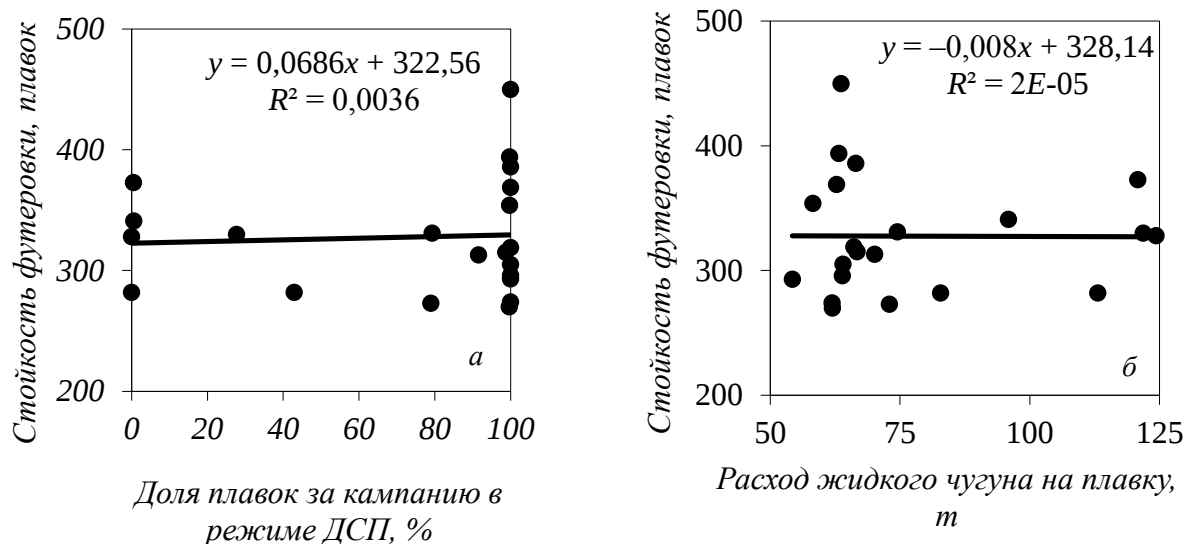


Рис. 1. Влияние доли плавов по режиму ДСП (а) и расхода жидкого чугуна (б) на стойкость футеровки ГМП
Fig. 1. Influence of the heats proportion in the EAF mode (a) and the consumption of liquid iron (б) on the FMF lining life

Влияние окисленности шлака

Оксиды железа, определяющие окислительную способность шлака, активно взаимодействуют с основными оксидами огнеупорной футеровки, образуя с ними ферриты различного состава. Поэтому поверхность агрегата, контактирующая со шлаком, подвергается активному химическому воздействию, что вызывает дополнительную коррозию огнеупоров, снижая стойкость футеровки (рис. 4). При этом снижение окисленности шлака в процессе рафинирования проблематично, так как содержание в шлаке оксидов железа повышается по мере обезуглероживания расплава. Эта взаимосвязь между остаточным содержанием углерода в стальном по-

лупродукте и содержанием оксида FeO в шлаке перед выпуском представлена на рис. 5.

Учитывая технологические особенности плавки с получением на выпуске низкоуглеродистого полупродукта, повышение содержание оксидов железа в шлаке в конце плавки неизбежно. Основной причиной проведения плавки стали с обезуглероживанием до 0,1 % и менее является стремление персонала обеспечить минимальное содержание фосфора (на уровне не более 0,010 %) в стальном полупродукте. Однако фактическое содержание фосфора в полупродукте в исследуемые периоды составило 0,04 – 0,06 %, что намного ниже требуемого, поэтому избыточное обезуглероживание расплава

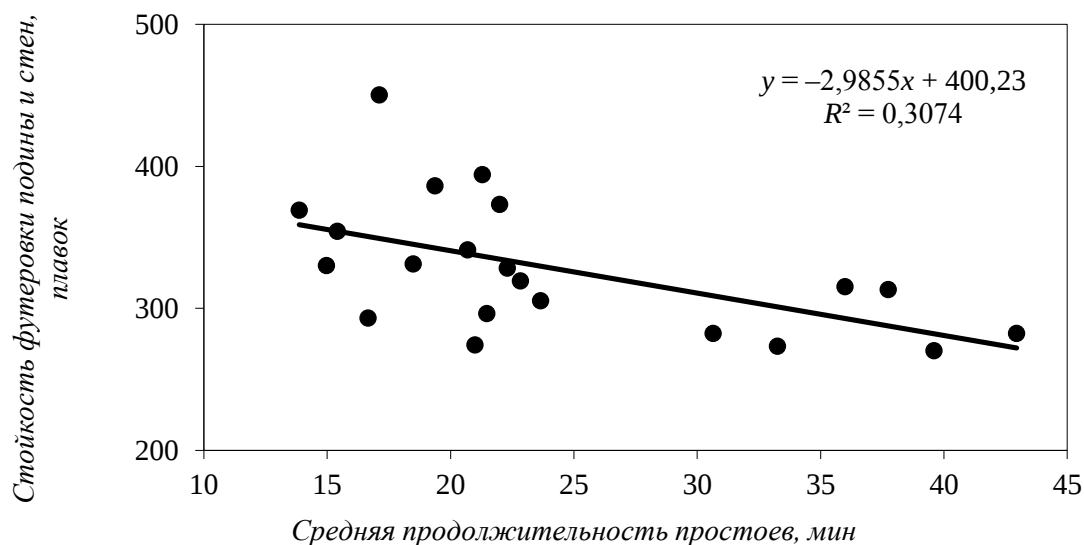


Рис. 2. Влияние длительности простоев на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 2. Influence of downtime duration on the bottom and wall linings life

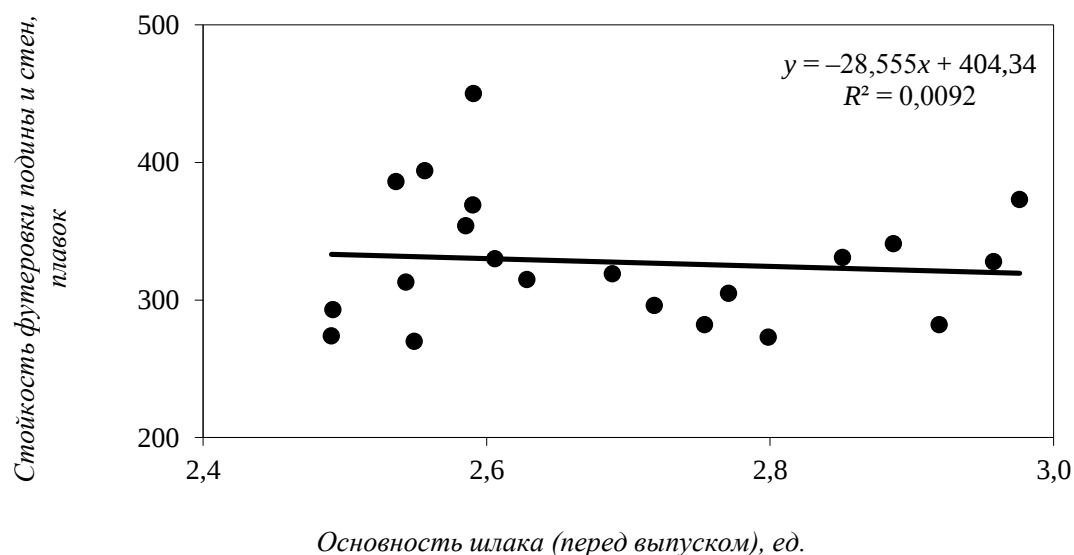


Рис. 3. Влияние основности шлака на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 3. Influence of slag basicity on the bottom and wall linings life

нецелесообразно. К сожалению, у технологического персонала отсутствуют возможности по оперативному контролю состава полупродукта, поэтому прекращение продувки осуществляют после визуального снижения количества отходящих газов. Для остановки продувки при заданном содержании углерода (в соответствии с выплавляемой маркой стали) необходимо оснащение печей системами контроля состава отходящих газов.

Содержание MgO в шлаке

Износ огнеупора является результатом одновременно протекающих процессов физического размывания поверхности футеровки (эрозии) и химического растворения (коррозии) огнеупора в шлаке [22 – 25]. Учитывая, что концентрация любого компонента в шлаке ограничивается пределами растворимости, то повышение содержания оксида MgO в печном шлаке способствует увеличению стойкости огнеупоров на основе периклаза, что подтверждается практическими данными [26 – 28]. Представленные на рис. 6 данные

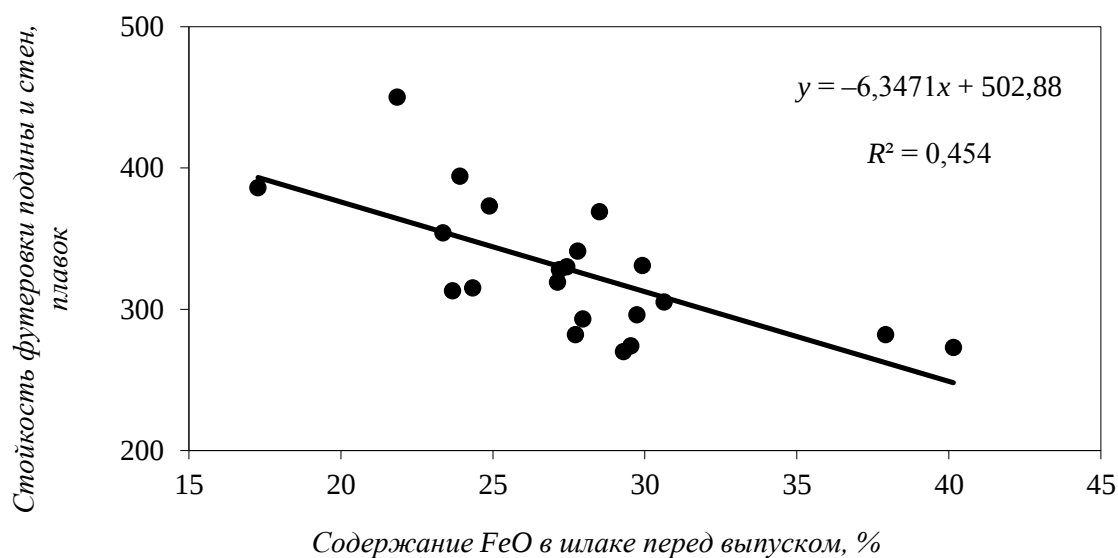


Рис. 4. Влияние содержания оксида FeO в печном шлаке на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 4. Influence of FeO content in furnace slag on the bottom and wall linings life

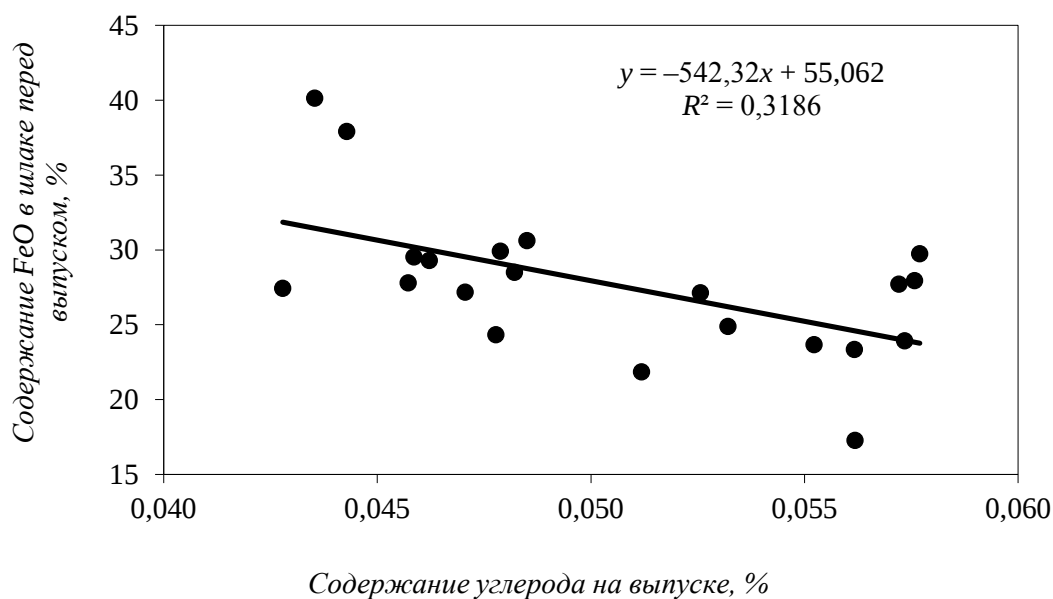


Рис. 5. Влияние содержания углерода в стальном полупродукте на окисленность печного шлака
Fig. 5. Influence of carbon content in semi-finished steel on oxidation of furnace slag

подтверждают существенное влияние магнезии в печном шлаке на стойкость огнеупорной футеровки ГМП. Поэтому не менее важным, с точки зрения стойкости футеровки, фактором является содержание оксида MgO в шлаке.

Помимо влияния оксида MgO на скорость эрозии магнезиальной футеровки, необходимо учитывать и то, что он в печном шлаке образует прочные соединения с оксидами кремния и железа, снижая активность последних. Оба эффекта приводят к значительному улучшению стойкости футеровки к шлаковому воздействию. Поэтому для повышения стойкости огнеупорной

футеровки целесообразно повысить содержание оксида MgO в печном шлаке до уровня не менее 8 – 10 %, что обеспечивается использованием доломита и других источников [27 – 30].

Тепловые условия плавки оказывают существенное влияние на процесс эксплуатации футеровки сталеплавильного агрегата, повышая термические нагрузки в огнеупорных материалах. Однако влияние этого фактора установить не удалось из-за отсутствия достоверной информации о тепловых режимах работы ГМП и незначительного колебания температуры металла перед выпуском.

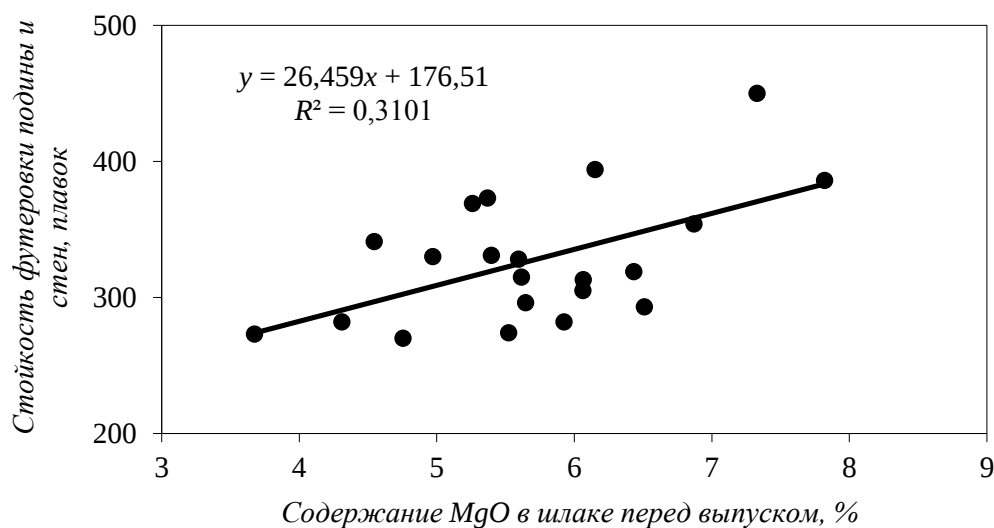


Рис. 6. Влияние содержания оксида MgO в печном шлаке на стойкость футеровки подины и стен
Fig. 6. Influence of MgO content in furnace slag on the bottom and wall linings life

Выводы

Для улучшения условий эксплуатации футеровки и повышения продолжительности кампании ГМП можно рекомендовать следующие технологические мероприятия:

- снижение продолжительности межплавочных периодов для минимизации термического воздействия на футеровку;
- уменьшение переокисления металла и шлака в результате остановки продувки при заданном содержании углерода (в соответствии с выплавляемой маркой стали);
- повышение содержания оксида MgO в шлаке до 8 – 10 %.

Выполнение разработанных технологических рекомендаций позволит увеличить стойкость огнеупорной футеровки минимум на 25 % с соответствующим снижением расходов на огнеупоры и ремонты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Briggs J. The Refractories Industry – A Review. *Materials Technology*. 2005;20(4):225–232. <https://doi.org/10.1080/10667857.2005.11753145>
2. Вислогузова Э.А., Кашеев И.Д., Земляной К.Г. Анализ влияния качества периклазоуглеродистых огнеупоров на стойкость футеровки конвертеров. *Новые огнеупоры*. 2013;3:127–133. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2013-3-127-133>
3. Серова Л.В., Чудинова Е.В., Хороших М.А. Разработка критериев оценки качества периклазоуглеродистых огнеупоров и их влияние на повышение стойкости футеровок конвертеров. *Черные металлы*. 2015;5(1001):21–23.
4. Roy I., Halder D., Mishra B. Development of Improved Quality Magnesia Carbon Brick by Incorporation of Industrial Grade Functionalised Multi-Walled Carbon Nanotube. *Inter-ceram – International Ceramic Review*. 2017;66:58–62. <https://doi.org/10.1007/BF03401231>
5. Манашев И.Р. Возможности повышения стойкости футеровок металлургических агрегатов путем применения в производстве огнеупоров новых композиционных СВС-материалов. *Теория и технология металлургического производства*. 2022;2(41):4–11.
6. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Дёма Р.Р., Колдин А.В. Влияние технологических параметров плавки на стойкость футеровки дуговой сталеплавильной печи в условиях АО «Уральская Сталь». *Новые огнеупоры*. 2019;7:3–7. <https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-7-3-7>
7. Sadri A., Cornett H., Mosnier M., Ying W.L., Ferrer B. Furnace Refractory Lining Barrier Monitoring Tools and Techniques. In: *Metal-lurgy and Materials Society of CIM (eds) Proceedings of the 63rd Conference of Metallurgists, COM 2024*. Springer, Cham. 2025:793–802. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67398-6_135
8. Nath D., Maji S., Singh A.K. Modeling of Arcing, Scrap Melting, and Temperature Evolution in the Refractory of a Lab-Scale Direct Current-Electric Arc Furnace. *Steel research international*. 2025;2300696. <https://doi.org/10.1002/srin.202300696>
9. Кузнецов М.С., Гареев Р.Р., Михеев А.Е. Пути повышения стойкости футеровки рабочего слоя металлургических агрегатов электросталеплавильного производства АО «Уральская Сталь». *Теория и технология металлургического производства*. 2021;2(37):7–10.
10. Исаков И.Ф., Валиахметов А.Х., Кузнецов М.С., Проскуровский Д.А., Шепелев Д.А. Особенности технологии выплавки стали в 120-тонных гибких модульных печах АО «Уральская Сталь». *Теория и технология металлургического производства*. 2021;2(37):19–23.
11. Бигеев А.М., Бигеев В.А. Металлургия стали. Теория и технология плавки стали. Магнитогорск: МГТУ им. Г.И. Носова. 2000:544.
12. Кудрин В.А. Теория и технология производства стали. Москва: Мир; ООО «Издательство АСТ». 2003:528.
13. Гудим Ю.А., Зинуров И.Ю., Киселев А.Д. Производство стали в дуговых печах. Конструкции, технология, материалы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2010:547.
14. Dai Y., Li J., Yan W. and Shi C. Corrosion mechanism and protection of BOF refractory for high silicon hot metal steelmaking process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):4292–4308. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.055>
15. Shapovalov A.N., Dema R.R., Nefed'ev S.P. Improving the Efficiency of Steel De-Oxidation at the Ural Steel. *Materials Science Forum*. 2020;989:400–405. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.400>
16. Шаповалов А.Н., Голубцов В.А., Бакин И.В., Рябчиков И.В. Применение комплексных модификаторов для снижения загрязненности стали коррозионно-активными неметаллическими включениями. *Черные металлы*. 2020;6(1062):4–10.

17. Куницын Г.А., Кузнецов М.С., Шаповалов А.Н., Бакин И.В. Применение комплексных модификаторов при производстве стали с повышенными требованиями по неметаллическим включениям. *Черные металлы*. 2022;5(1085):9–15.
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.05.02>
18. Кашеев И.Д. Рабочие свойства и применение огнеупоров в промышленных печах. *Новые огнеупоры*. 2008;2:3–5.
19. Schacht C. ed. *Refractory Linings: Thermomechanical Design and Applications*: CRC Press, Boca Raton. 2019:504.
<https://doi.org/10.1201/9780203741078>
20. Oliveira R.L.G., Rodrigues J.P.C., Pereira J.M., Lourenço P.B., Marschall H.U. Thermomechanical behaviour of refractory dry-stacked masonry walls under uniaxial compression, *Engineering Structures*. 2021;240:112361.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112361>
21. Григорьев А.С., Данильченко С.В., Заболотский А.В., Мигашкин А.О., Турчин М.Ю., Хадыев В.Т. Особенности разрушения футеровки в оборудовании разного размера. *Новые огнеупоры*. 2022;1(12):3–11.
<https://doi.org/10.17073/1683-4518-2022-12-3-11>
22. Lee W.E., Zhang S. Melt corrosion of oxide and oxide-carbon refractories. *International Materials Reviews*. 1999;44(3):77–104.
<https://doi.org/10.1179/095066099101528234>
23. Qin J., Qi, J. L. Analysis on the Refractory Erosion of the Electric Arc Furnace and Study on the Measures of Protecting the Furnace Lining. *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd*. 2012; 602–604:2082–2086.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.2082>
24. Biswas S., Sarkar D. Refractory Practice in Electric Arc Furnace. In: *Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking*. Springer, Cham. 2020:249–267.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-43807-4_5
25. Pang Z., Zuo H. Corrosion Behavior of MgO – C Refractory in the Electric Arc Furnace that Entirely Uses Direct Reduced Iron as Raw Materials. In: *Advances in Pyrometallurgy (TMS 2024). The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. 2024.157–170.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-50176-0_12
26. Кушнарёв А.В., Вислогузова Э.А., Устенко А.С., Ремиго С.А. Опыт использования MgO-содержащих материалов для повышения стойкости футеровок конвертеров. *Новые огнеупоры*. 2007;4:3–5.
27. Шевченко Е.А., Шаповалов А.Н., Братковский Е.В. Повышение стойкости футеровки дуговых сталеплавильных печей путем совершенствования шлакового режима с применением магнийсодержащих материалов. *Черные металлы*. 2018;9:16–21.
28. Бабенко А.А., Смирнов Л.А., Протопопов Е.В., Михайлова Л.Ю. Теоретические основы и технология выплавки стального полупродукта в конвертерах и ДСП под магнезиальными шлаками. *Известия вузов. Черная Metallургия*. 2020;63(7):491–498.
29. Кашеев И.Д., Терентьев Е.А., Демидов К.Н., Борисова Т.В., Маряев И.Г. Свойства и структура магнезиальных модификаторов конвертерных шлаков. *Новые огнеупоры*. 2007;2:27–32.
30. Сметанников А.В., Шуклин А.В., Захарова Т.П., Фейлер С.В., Неунывахина Д.Т. Применение перспективных флюсообразующих материалов для повышения стойкости футеровки дуговой сталеплавильной печи. *Сталь*. 2019;7:28–30.

REFERENCES

1. Briggs, J. The Refractories Industry – A Review. *Materials Technology*. 2005;20(4):225–232.
<https://doi.org/10.1080/10667857.2005.11753145>
2. Visloguzova E.A., Kashcheev I.D., Zemlyanoi K.G. Analysis of the influence of the quality of periclase-carbon refractories on the durability of converter linings. *Novye огнеупоры*. 2013;3:127–133. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/1683-4518-2013-3-127-133>
3. Serova L.V., Chudinova E.V., Khoroshikh M.A. Development of criteria for assessing the quality of periclase-carbon refractories and their impact on increasing the durability of converter linings. *Chernye metally*. 2015;5(1001):21–23. (In Russ.).
4. Roy I., Halder D., Mishra B. Development of Improved Quality Magnesia Carbon Brick by Incorporation of Industrial Grade Functionalised Multi-Walled Carbon Nanotube. *Inter-ceram – International Ceramic Review*. 2017;66:58–62.
<https://doi.org/10.1007/BF03401231>
5. Manashev I.R. Possibilities of increasing the durability of linings of metallurgical units by using new composite SHS materials in the production of refractories. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2022;2(41):4–11. (In Russ.).
6. Shevchenko E.A., Shapovalov A.N., Dema R.R., Koldin A.V. The influence of technological parameters of melting on the durability of the lining of an electric arc furnace under the condi-

- tions of JSC Ural Steel. *Novye ognepory*. 2019;7:3–7. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17073/1683-4518-2019-7-3-7>
7. Sadri A., Cornett H., Mosnier M., Ying W.L., Ferrer B. Furnace Refractory Lining Barrier Monitoring Tools and Techniques. In: *Metalurgy and Materials Society of CIM. Proceedings of the 63rd Conference of Metallurgists, COM 2024*. Springer, Cham. 2025:793–802.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-67398-6_135
 8. Nath D., Maji S., Singh A.K. Modeling of Arcing, Scrap Melting, and Temperature Evolution in the Refractory of a Lab-Scale Direct Current-Electric Arc Furnace. *Steel research international*. 2025;2300696.
<https://doi.org/10.1002/srin.202300696>
 9. Kuznetsov M.S., Gareev R.R., Mikheev A.E. Ways to increase the durability of the lining of the working layer of metallurgical units of electric steelmaking production of JSC Ural Steel. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2021;2(37):7–10. (In Russ.).
 10. Iskakov I.F., Valiakhmetov A.Kh., Kuznetsov M.S., Proskurovskii D.A., Shepelev D.A. Features of steel smelting technology in 120-ton flexible modular furnaces of Ural Steel JSC. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2021;2(37):19–23. (In Russ.).
 11. Bigeev A.M., Bigeev V.A. *Metallurgy of steel. Theory and technology of steel smelting*. Magnitogorsk: MG TU im. G.I. Nosova. 2000:544. (In Russ.).
 12. Kudrin V.A. *Theory and technology of steel production*. Moscow: Mir; ООО «Izdatel'stvo AST». 2003:528. (In Russ.).
 13. Gudim Yu.A., Zinurov I.Yu., Kiselev A.D. Steel production in arc furnaces. Designs, technology, materials: monograph. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2010:547. (In Russ.).
 14. Dai Y., Li J., Yan W. and Shi C. Corrosion mechanism and protection of BOF refractory for high silicon hot metal steelmaking process. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(3):4292–4308.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.02.055>
 15. Shapovalov A.N., Dema R.R., Nefed'ev S.P. Improving the Efficiency of Steel De-Oxidation at the Ural Steel. *Materials Science Forum*. 2020;989:400–405.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.989.400>
 16. Shapovalov A.N., Golubtsov V.A., Bakin I.V., Ryabchikov I.V. Application of complex modifiers to reduce contamination of steel with corrosion-active non-metallic inclusions. *Chernye metally*. 2020;6(1062):4–10. (In Russ.).
 17. Kunitsyn G.A., Kuznetsov M.S., Shapovalov A.N., Bakin I.V. Application of complex modifiers in the production of steel with increased requirements for non-metallic inclusions. *Chernye metally*. 2022;5(1085):9–15. (In Russ.).
<https://doi.org/10.17580/chm.2022.05.02>
 18. Kashcheev I.D. Performance properties and application of refractories in industrial furnaces. *Novye ognepory*. 2008;2:3–5. (In Russ.).
 19. Schacht C. ed. *Refractory Linings: Thermomechanical Design and Applications*. CRC Press, Boca Raton. 2019:504.
<https://doi.org/10.1201/9780203741078>
 20. Oliveira R.L.G., Rodrigues J.P.C., Pereira J.M., Lourenço P.B., Marschall H.U. Thermomechanical behaviour of refractory dry-stacked masonry walls under uniaxial compression, *Engineering Structures*. 2021;240:112361.
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112361>
 21. Grigoriev A.S., Danilchenko S.V., Zabolotsky A.V., Migashkin A.O., Turchin M.Yu., Khadyev V.T. Features of the Fracture of Refractory Linings Depending on the Equipment Size. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2023;63:585–592.
<https://doi.org/10.1007/s11148-023-00773-6>
 22. Lee W.E., Zhang S. Melt corrosion of oxide and oxide-carbon refractories. *International Materials Reviews*. 1999; 44(3):77–104.
<https://doi.org/10.1179/095066099101528234>
 23. Qin J., Qi, J.L. Analysis on the Refractory Erosion of the Electric Arc Furnace and Study on the Measures of Protecting the Furnace Lining. *Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd*. 2012;602-604:2082–2086.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.602-604.2082>
 24. Biswas S., Sarkar D. Refractory Practice in Electric Arc Furnace. *Introduction to Refractories for Iron- and Steelmaking*. Springer, Cham. 2020:249–267.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-43807-4_5
 25. Pang Z., Zuo H. Corrosion Behavior of MgO-C Refractory in the Electric Arc Furnace that Entirely Uses Direct Reduced Iron as Raw Materials. In: *Advances in Pyrometallurgy. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. 2024:157–170.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-50176-0_12
 26. Kushnarev A.V., Visloguzova E.A., Ustenko A.S., Remigo S.A. Experience of using MGO-containing materials to increase the durability of converter linings. *Novye ognepory*. 2007;4:3–5. (In Russ.).
 27. Shevchenko E.A., Shapovalov A.N., Bratkovskii E.V. Increasing the durability of the lining of electric arc steel-making furnaces by improving the slag regime using magnesium-

containing materials. *Chernye metally*. 2018;9:16–21. (In Russ.).

28. Babenko A.A., Smirnov L.A., Protopopov E.V., Mikhailova L.Yu. Theoretical foundations and technology of smelting steel semi-finished products in converters and EAF under magnesia slags. *Izvestiya vuzov. Chernaya Metallurgiya*. 2020;63(7):491–498. (In Russ.).
29. Kashcheev I.D., Terent'ev E.A., Demidov K.N., Borisova T.V., Maryasev I.G. Properties and structure of magnesia modifiers of converter slags. *Novye ognepory*. 2007;27–32. (In Russ.).
30. Smetannikov A.V., Shuklin A.V., Zakharova T.P., Feiler S.V., Neunyvakhina D.T. Application of advanced flux-forming materials to improve the durability of arc furnace linings. *Stal'*. 2019;7:28–30. (In Russ.).

Сведения об авторах:

Евгений Вячеславович Женин, к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС»

E-mail: zhenin.ev@misis.ru

SPIN-код: 321471

Алексей Николаевич Шаповалов, к.т.н., доцент кафедры металлургических технологий и оборудования, Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС»

E-mail: alshapo@misis.ru

ORCID: 0000-0003-0888-814X

SPIN-код: 477659

Information about the authors:

Evgenij V. Zhenin, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS

E-mail: zhenin.ev@misis.ru

SPIN-код: 321471

Aleksey N. Shapovalov, Ph.D. (Eng.), Associate Professor of Metallurgical Technologies and Equipment Department, Novotroitsk branch of University of Science and Technology MISIS

E-mail: alshapo@misis.ru

ORCID: 0000-0003-0888-814X

SPIN-код: 477659

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 27.02.2025

После доработки 10.03.2025

Принята к публикации 18.03.2025

Received 27.02.2025.

Revised 10.03.2025

Accepted 18.03.2025