

Оригинальная статья

УДК 669.1

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-4(54)-83-90

**ПРИМЕНЕНИЕ КВАРЦИТОВЫХ ОГНЕУПОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ФУТЕРОВКЕ
РАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ**

© 2025 г. К. А. Коренная¹, А. С. Запольский¹, А. Ю. Пронякин¹, М. В. Темлянцев²,
Е. М. Запольская², Н. И. Кувшинникова²

¹АО «Кузнецкие ферросплавы» (654032, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Обнорского, 170)

²Сибирского государственного индустриального университета (654007, Россия, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

Аннотация. Рассмотрен вопрос разработки новых огнеупоров для футеровки ковшей ферросплавного производства. Представлен опыт применения огнеупорных кварцитовых кирпичей в качестве футеровки разливочных ковшей при производстве ферросилиция. Исследование направлено на повышение стойкости футеровки, увеличение межремонтных интервалов и снижение эксплуатационных затрат. Получено, что основной причиной разрушения рабочего слоя огнеупорной футеровки разливочного ковша является значительный перепад температур по толщине футеровки (до 1000 °С и более), возникающий в относительно короткий промежуток времени (термический удар). Основным разрушающим фактором являются термические напряжения в огнеупорной футеровке, возникающие при приеме расплава. Проведены эксперименты на АО «Кузнецкие ферросплавы», в ходе которых кварцитовые кирпичи, изготовленные по безобжиговой технологии с использованием жидкого стекла, были установлены в зоне наибольшего износа футеровки ковша. Кварцитовая футеровка выдержала 23 налива ферросилиция марки ФС75, что превышает стандартные показатели шамотного кирпича (10 – 15 наливов). Проведенные исследования выявили лучшую устойчивость кварцитового материала к термическим напряжениям и химическому воздействию расплава. Минералогические исследования подтвердили формирование устойчивых фаз (кристаллит, тридимит) в рабочей зоне, что способствует повышению долговечности футеровки. В огнеупоре присутствует наименее измененная брекчиевидная зона, переходная зона, кристаллит-тридимитовая, шлаковидная (внутренняя рабочая) зоны, кристаллитовая (внешняя рабочая) зона огнеупоров. Использование кварцитовых огнеупоров возможно для увеличения срока службы разливочных ковшей, снижения количества отходов и улучшения экономических и экологических показателей производства.

Ключевые слова: производство ферросилиция, разливочный ковш, огнеупорная футеровка, стойкость футеровки, кварцитовый кирпич, минералогическое исследование, кристаллит, тридимит

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-00087-2401.

Для цитирования: Коренная К.А., Запольский А.С., Пронякин А.Ю., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Кувшинникова Н.И. Применение кварцитовых огнеупорных материалов в футеровке разливочных ковшей при производстве ферросилиция. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;4(54):83–90. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-83-90](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-83-90)

Original article**THE USE OF QUARTZITE REFRACTORY MATERIALS IN THE LINING OF CASTING LADLES IN THE PRODUCTION OF FERROSILICON**

© 2025 K. A. Korennaya¹, A. S. Zapolsky¹, A. Y. Pronyakin¹, M. V. Temlyantsev²,
E. M. Zapolskaya², N. I. Kuvshinnika²

¹AO Kuznetsk Ferroalloys (170 Obnorskogo str., Novokuznetsk, Kemerovo Region, 654032, Russian Federation)

²Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass, 654007, Russian Federation)

Abstract. The issue of developing new refractories for lining ferroalloy buckets is considered. The experience of using refractory quartzite bricks as a lining for casting ladles in the production of ferrosilicon is presented. The research is aimed at increasing the durability of the lining, increasing repair intervals and reducing operating costs. It was found that the main reason for the destruction of the working layer of the refractory lining of the filling bucket is a significant temperature difference in the thickness of the lining (up to 1000 °C or more), which occurs in a relatively short period of time (thermal shock). The main destructive factor is the thermal stresses in the refractory lining that occur when the melt is ingested. Experiments were conducted at JSC Kuznetsk Ferroplanes, during which quartzite bricks made using non-annealing technology using liquid glass were installed in the zone of greatest wear of the bucket lining. The quartzite lining has withstood 23 pours of ferrosilicon grade FS75, which exceeds the standard values of fireclay bricks (10-15 pours). The conducted studies revealed the best resistance of the quartzite material to thermal stresses and chemical effects of the melt. Mineralogical studies have confirmed the formation of stable phases (cristobalite, tridymite) in the working area, which helps to increase the durability of the lining. The refractory contains the least modified breccia-like zone, a transition zone, a cristobalite-tridymite, slag-like (inner working) zone, and a cristobalite (outer working) zone of refractories. The use of quartzite refractories is possible to extend the service life of filling buckets, reduce waste and improve the economic and environmental performance of production.

Keywords: ferrosilicon production, casting ladle, refractory lining, lining durability, quartzite brick, mineralogical research, cristobalite, tridymite.

Funding. The study was conducted within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-00087-2401.

For citation: Korennaya K.A., Zapolsky A.S., Pronyakin A.Yu., Temlyantsev M.V., Zapolskaya E.M., Kuvshinnikova N.I. Application of quartzite refractory materials in the lining of casting ladles in the production of ferrosilicon. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;4(54):83–90. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4\(54\)-83-90](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-4(54)-83-90)

Введение

Основным фактором, определяющим срок службы разливочных ковшей металлургического производства, является износостойкость футеровки [1; 2]. Увеличение стойкости огнеупорных материалов позволяет снизить частоту ремонтов, затраты на обслуживание ковшей, себестоимость производимых металлов и сплавов.

Одним из актуальных направлений является разработка новых огнеупоров для футеровки ковшей ферросплавного производства [3; 4]. В настоящее время в производстве ферросилиция в основном применяют ковши, футерованные шамотным кирпичом. Высокие температуры расплава ферросилиция приводят к растворению огнеупорного материала вследствие интенсивного химического взаимодействия кислого шлака и алюмосиликатной

шамотной футеровки [5]. Сильным разрушающим фактором являются термические напряжения в огнеупорной футеровке, возникающие при приеме расплава. Шамотные огнеупоры обладают относительно высокой термической стойкостью, но при температурах жидкого ферросилиция 1650 – 1700 °C и отсутствии высокотемпературного предплавленного разогрева ковшей на стендах [6], фактически подвергаются термическим ударам [7 – 9].

Анализ эксплуатационных характеристик футеровок разливочных ковшей позволил установить, что износ имеет ярко выраженный неравномерный характер, максимальные повреждения образуются в местах падения струи металла и вблизи шлакового пояса [10 – 12]. Регламентируемая стойкость ковшей при производстве ферроси-



Рис. 1. Экспериментальный разливочный ковш до начала применения
Fig. 1. Experimental filling ladle before application

лиция составляет не менее 10 – 15 наливов в зависимости от марки применяемого огнеупора [13].

После демонтажа отработанной футеровки лом шамотных огнеупоров имеет ограниченную область вторичного использования [14], так как ошлакован и имеет вкрапления ферросилиция. Увеличение стойкости футеровки, повышение срока службы огнеупоров позволяют снизить количество отходов (лома огнеупоров), что также положительно скажется на экономической и экологической эффективности производства ферросилиция.

Методы и результаты исследований

Одним из известных способов повышения стойкости ковшевых футеровок является применение огнеупоров близких по химическому составу к шлаку [1 – 3]. В условиях производства ферросилиция к таким огнеупорам относятся кремнеземистые, кварцевые, содержащие в своей основе SiO_2 [5].

На АО «Кузнецкие ферросплавы» проведена серия экспериментов по применению в футеровке разливочных ковшей кварцевых огнеупоров. Опытно-промышленная партия кирпичных изделий стандартных размеров ($230 \times 114 \times 65$ мм) [15] произведена из кварцитов Антоновского месторождения по безобжиговой технологии. В качестве связующего использовали натриевое жидкое стекло плотностью 1310 кг/м^3 собственного производства. Полуфабрикаты изделий (сырец) просушивали в сушильном шкафу в течение 24 ч при температуре 120°C . Плотность экспериментальных огнеупоров составила 2170 кг/м^3 , прочность на сжатие $8,5 - 9,0 \text{ МПа}$, на изгиб $0,8 - 1,0 \text{ МПа}$.

Экспериментальные кварцевые кирпичи использованы в рабочем слое футеровки в зоне наибольшего износа в районе одной из цапф от подины до верхней части ковша, при этом остальную футеровку выполняли из обычного шамотного кирпича марки ШАК-I № 5 со средней стойкостью 17 наливов (рис. 1).

В результате экспериментов проведено 23 налива расплава ферросилиция марки ФС75. Разливочный ковш выведен из эксплуатации из-за уменьшения рабочего объема в результате образования настыли. После 23-го налива температура кожуха ковша под цапфой составила 267°C со стороны, футерованной кварцевым кирпичом, и 280°C со стороны, футерованной ШАК-I № 5.

Сравнительная визуальная оценка поверхности футеровки показала, что кварцевые кирпичи имеют значительно меньший износ по сравнению с шамотными огнеупорами (рис. 2). На поверхности кварцевых огнеупоров меньше глубоких трещин, выкалываний и выкрашиваний.

Основной причиной разрушения рабочего слоя огнеупорной футеровки разливочного ковша является значительный перепад температур (до 1000°C и более), возникающий в относительно короткий промежуток времени (термический удар) [16 – 18]. Механизм разрушения огнеупоров вследствие термического удара достаточно хорошо изучен [1 – 3]. Поверхность кирпича, контактирующая с расплавом, интенсивно нагревается и стремится расширяться, но внутренние холодные слои кирпича остаются в неизменном состоянии и препятствуют этому расширению. В результате возникают термические напряжения, которые приводят к образованию трещин



Рис. 2. Экспериментальный разливочный ковш после 23 наливов
Fig. 2. Experimental filling ladle after 23 refills

в рабочем слое футеровки (рис. 2). Через образовавшиеся трещины расплав ферросилиция проникает вглубь футеровки и затвердевает [19; 20]. При последующем разогреве вследствие различных коэффициентов термического расширения огнеупора и ферросилиция возникают напряжения, которые вызывают постепенное развитие (углубление и расширение) трещин с последующим отслоением отдельных фрагментов огнеупорной футеровки, возникновении характерных сколов и выкрашиваний (рис. 3).

Для определения минералогического состава кварцитовых огнеупоров после эксплуатации



Рис. 3. Структура огнеупора после 23 наливов
Fig. 3. The structure of the refractory after 23 refills

проведено исследование с помощью стереомикроскопа ЛабоСтеми-4 зум при небольшом увеличении ($\times 5 - 40$) и ЛабоПол-2 РПО полированных аншлифов в отраженном свете при увеличении $\times 50 - 400$. Образцы для исследований отбирали из участков огнеупорного кирпича, находящихся на различном расстоянии от поверхности контакта с расплавом. Огнеупоры обладают обильной пористостью (от крупной до мелкой), а также трещиноватостью. В процессе шлифования происходило выкрашивание мелких зерен, что затрудняло процесс исследований.

Кварцитовый огнеупор имеет следующее зональное строение (в зависимости от удаленности от рабочей поверхности):

- наименее измененная брекчиевидная зона;
- переходная зона зеленовато-серого цвета;
- кристобалит-тридимитовая, черная, шлаковидная (внутренняя рабочая) зона;
- серая или черная, кристобалитовая (внешняя рабочая) зона.

В месте контакта кварцитового огнеупора и расплава ферросилиция образовалась пористая масса буровато-серого цвета, имеющая стекланный блеск и стекловидную структуру (рис. 4). Рабочая поверхность неровная и покрыта стекловидной пленкой сероватого или буроватого цвета, на которой встречаются настыли ферросплава. Поверхность между настылями и рабочей зоной огнеупора очень неровная за счет внедрения металла по трещинам в глубокие горизонты рабочей зоны. Измененная в процессе контакта с расплавом масса кварцитового огнеупора состоит из октаэдрических кристаллов β -кристобалита или псевдоморфно замещающего его тридимита и густо переплетенных меж-

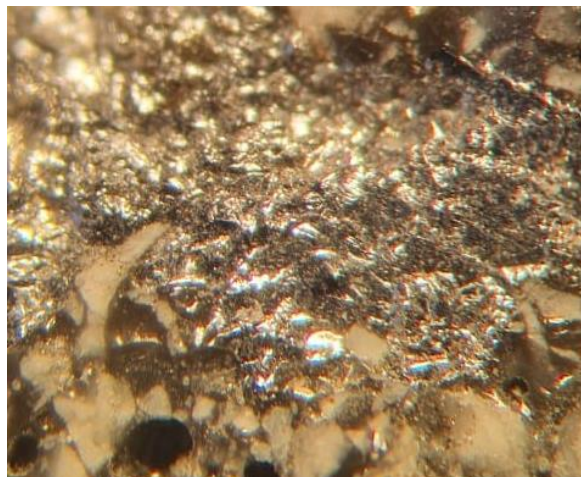


Рис. 4. Рабочая зона огнеупора (увеличение 20)
Fig. 4. The working area of the refractory (magnification 20)



Рис. 5. Тридимитовая зона огнеупора
Fig. 5. Tridymite zone of refractory

ду собой короткопризматических и таблитчатых кристаллов, копьевидных двойников и иголок тридимита.

Переходная зона содержит меньше кварца и характеризуется большей степенью его перерождения, большим количеством стекловидного вещества, метакристаллита и мелких кристаллов тридимита. Тридимитовая зона состоит из большого количества довольно крупных кристаллов тридимита, образующих между собой сrostок. Промежутки между ними заполнены желтоватым, бурым, а иногда непрозрачным стекловидным веществом (рис. 5).

По мере приближения к кристобалитовой зоне кристобалитовые участки переходят в тридимит. Такие участки отличаются от остальной массы огнеупоров мелкими размерами кристаллов тридимита. Ближе к кристобалитовой зоне исчезает заметное различие между размерами кристаллов тридимита, образовавшихся из основной массы и крупных обломков кварцита. В тридимитовой зоне кристаллы тридимита имеют наибольшие размеры. Присутствуют они в основном в виде призм.

Кристобалитовая зона состоит из анизотропного чешуйчатого кристобалита (рис. 6). Он образует участки округлой, иногда вытянутой формы, состоящие из изометричных, как бы наложенных друг на друга чешуек.

Лом экспериментальных кварцитовых огнеупоров содержит вкрапления и прослойки ферросилиция и ферросплавного шлака. Следуя из его химического и гранулометрического состава такой лом возможно использовать в качестве шихтового материала (подшихтовки) для плавки ферросилиция, таким образом реализуя рециклинг отходов ферросплавного производства. По сравнению с ломом алюмосиликатных шамотных огнеупоров он фактически не содержит оксид Al_2O_3 .

Выводы

В результате проведенных исследований установлено, что кварцитовые безобжиговые огнеупоры при эксплуатации в ковшах при производстве ферросилиция показали более высокую (не менее чем на 35 %) стойкость по сравнению с шамотными. Они более стойки к термическим ударам и химическому воздействию кислых шлаков. После эксплуатации кварцитовые огнеупоры имеют выраженное зональное строение (в зависимости от удаленности рабочей зоны). Присутствуют наименее измененная брекчиевидная зона, переходная зона зеленовато-серого цвета, кристобалит-тридимитовая, черная, шлаковидная (внутренняя рабочая) зоны, серая или черная, кристобалитовая (внешняя рабочая) зона. Лом экспериментальных кварцитовых огнеупоров возможно использовать в качестве шихтового материала (подшихтовки) для плавки ферросилиция.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стариков В.С., Темлянец М.В., Стариков В.В. *Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии*. Москва: МИСИС, 2003:328.
2. Кашеев И.Д., Стрелов К.К., Мамыкин П.С. *Химическая технология огнеупоров*. Москва: Интермет Инжиниринг, 2007:752.
3. Алленштейн Й. Огнеупорные материалы. Структура, свойства, испытания / под ред. Г. Роучка, Х. Вутнау. Москва: Интермет Инжиниринг, 2010:392.
4. Запольский А.С., Темлянец М.В. Способы повышения стойкости футеровок разливочных ковшей ферросплавного производства. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;4(50):83–91.

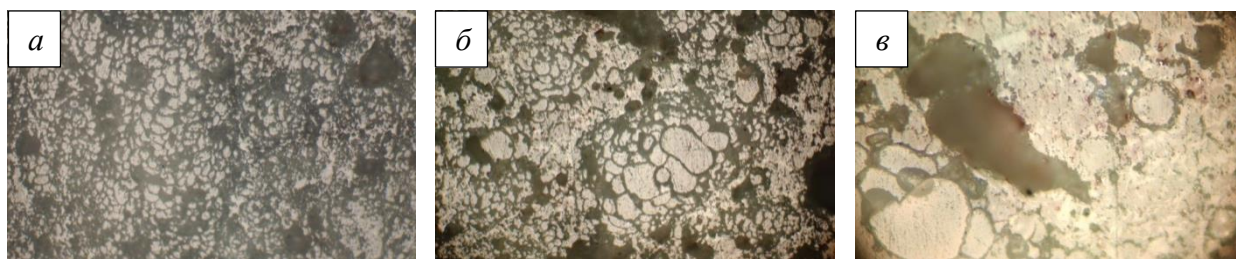


Рис. 6. Кристаллы кристобалита; отраженный свет (увеличение 50 (а), 100 (б), 200 (в))
Fig. 6. Cristobalite crystals. Reflected light (magnification 50 (a), 100 (b), 200 (v))

5. Пронякин А.Ю. Применение кварцита Антоновского месторождения в качестве заполнителя при производстве огнеупорных бетонных изделий. *Огнеупоры и техническая керамика*. 2003;2:35–38.
6. Запольская Е.М., Темлянцев М.В., Костюченко К.Е. Анализ основных направлений повышения энерготехнологической эффективности стенов высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. *Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение*. 2013;15:128–134.
7. Michael Hampel. Beitrag zur Eigenschaftsbewertung von feuerfesten Magnesiakohlenstoffzeugnissen: Dissertation. *Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg*. 2010:226.
8. Andreev K., Luchini B., Rodrigues M.J., Alves J.L. Role of fatigue in damage development of refractories under thermal shock loads of different intensity. *Ceram. INT*. 2020;(46):20707–20716. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.04.235>
9. Prikhod'ko E.V. Analysis of methods for heating the lining of high-temperature units. *Refractories and industrial ceramics*. 2021;62(4):463–466. <https://doi.org/10.1007/S11148-021-00625-1>
10. Scheunis L., Fallah-Mehrjardi A., Campforts M., Jones P.T., Blanpain B., Malfliet A., Jak E. The effect of a temperature gradient on the phase formation inside a magnesia–chromite refractory in contact with a non-ferrous PbO – SiO₂ – MgO slag. *Journal of the european ceramic society*. 2015;35(10):2933–2942.
11. Yuxiang Dai, Jing Li, Wei Yan, Chengbin Shi. 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>
12. Zabolotskiy A.V., Turchin M.Y., Khadyev V.T., Migashkin A.O. Numerical investigation of refractory stress-strain condition under transient thermal load. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2310:020355.
13. Запольский А.С. Способы повышения стойкости футеровок разливочных ковшей в условиях действующего производства АО «Кузнецкие ферросплавы». В кн.: *XIII Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации", посвященный 80-й годовщине победы в Великой Отечественной войне 1941 – 1945 годов. Сборник тезисов докладов*. Кемерово, 2025:206–210.
14. Черепанов К.А., Абрамович С.М., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н. *Рециклинг твердых отходов в металлургии*. Москва: Флинта: Наука, 2004:212.
15. ГОСТ 8691 – 2018 «Изделия огнеупорные общего назначения. Форма и размеры». URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160577> (дата обращения: 02.09.2025).
16. Andreev K.P., Luchini B., Rodrigues M.J., Alves J.L. Role of fatigue in damage development of refractories under thermal shock loads of different intensity. *Ceramics International*. 2020;46(13):20707–20716. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.235>
17. Andreev K.P., Yin Y., Luchini B., Sabirov I. Failure of refractory masonry material under monotonic and cyclic loading – Crack propagation analysis. *Construction and Building Materials*. 2021;299:124–203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124203>
18. Cherepanov G.P. The mechanics and physics of fracturing: application to thermal aspects of crack propagation and to fracking. *Phil. Trans. R. Soc.* 2014. <http://doi.org/10.1098/rsta.2014.0119S>
19. Harmuth H., Bradt R.C. Investigation of refractory brittleness by fracture mechanical and fractographic methods. *Interceram Int. Ceram. Rev.* 2010;1:6–10.
20. Harmuth H. Characterisation of the Fracture Path in 'Flexible' Refractories. *Adv. Sci. Technol.* 2010;70:30–36.

REFERENCES

1. Starikov V.S., Temlyantsev M.V., Starikov V.V. *Refractories and fittings in bucket metallurgy*. Moscow: MISIS, 2003:328. (In Russ.).

2. Kashcheev I.D., Strelov K.K., Mamykin P.S. *Chemical technology of refractories*. Moscow: Internet Inzhiniring, 2007:752. (In Russ.).
3. Allenshtein I. *Refractory materials. Structure, properties, and tests* / G. Rouchka, K.H. Vutnau. ed. Moscow: Internet Inzhiniring, 2010:392. (In Russ.).
4. Zapol'skii A.S., Temlyantsev M.V. Ways to increase the durability of ferro-alloy casting ladles. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;4(50):83–91. (In Russ.).
5. Pronyakin A.YU. The use of quartzite from the Antonov deposit as a filler in the production of refractory concrete products. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika*. 2003;2:35–38. (In Russ.).
6. Zapol'skaya E.M., Temlyantsev M.V., Kostyuchenko K.E. Analiz osnovnykh napravlenii povysheniya energotekhnologicheskoi effektivnosti stendov vysokotemperaturnogo razogreva futerovok stalerazlivochnykh kovshei. *Vestnik Rossiiskoi akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otделение*. 2013;15:128–134. (In Russ.).
7. Michael Hampel. Beitrag zur Eigenschaftsbewertung von feuerfesten Magnesiakohlenstoffzeugnissen: Dissertation. *Technische Universität Bergakademie Freiberg. Freiberg*. 2010:226.
8. Andreev K., Luchini B., Rodrigues M.J., Alves J.L. Role of fatigue in damage development of refractories under thermal shock loads of different intensity. *Ceram. INT*. 2020;(46):20707–20716. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2020.04.235>
9. Prikhod'ko E.V. Analysis of methods for heating the lining of high-temperature units. *Refractories and industrial ceramics*. 2021;62(4):463–466. <https://doi.org/10.1007/S11148-021-00625-1>
10. Scheunis L., Fallah-Mehrjardi A., Campforts M., Jones P.T., Blanpain B., Malfliet A., Jak E. The effect of a temperature gradient on the phase formation inside a magnesia–chromite refractory in contact with a non-ferrous PbO – SiO₂ – MgO slag. *Journal of the european ceramic society*. 2015;35(10):2933–2942.
11. Yuxiang Dai, Jing Li, Wei Yan, Chengbin Shi. 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>
12. Zabolotskiy A.V., Turchin M.Y., Khadyev V.T., Migashkin A.O. Numerical investigation of refractory stress-strain condition under transient thermal load. *AIP Conference Proceedings*. 2020;2310:020355.
13. Zapol'skii A.S. Methods of increasing the durability of lining ladles in the conditions of the current production of JSC Kuznetsk Ferroalloys. In: *XIII International Congress "Kuzbass: Education, Science, Innovation", dedicated to the 80th anniversary of victory in the Great Patriotic War of 1941 – 1945*. Collection of abstracts. Kemerovo, 2025:206–210. (In Russ.).
14. Cherepanov K.A., Abramovich S.M., Temlyantsev M.V., Temlyantseva E.N. *Solid waste recycling in metallurgy*. Moscow: Flinta: Nauka, 2004:212. (In Russ.).
15. GOST 8691–2018 "General purpose refractory products. Shape and dimensions". URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200160577> (Accessed: 02.09.2025). (In Russ.).
16. Andreev K.P., Luchini B., Rodrigues M.J., Alves J.L. Role of fatigue in damage development of refractories under thermal shock loads of different intensity. *Ceramics International*. 2020;46(13):20707–20716. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.04.235>
17. Andreev K.P., Yin Y., Luchini B., Sabirov I. Failure of refractory masonry material under monotonic and cyclic loading – Crack propagation analysis. *Construction and Building Materials*. 2021;299:124–203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124203>
18. Cherepanov G.P. The mechanics and physics of fracturing: application to thermal aspects of crack propagation and to fracking. *Phil. Trans. R. Soc.* 2014. <http://doi.org/10.1098/rsta.2014.0119S>
19. Harmuth H., Bradt R.C. Investigation of refractory brittleness by fracture mechanical and fractographic methods. *Interceram Int. Ceram. Rev.* 2010;1:6–10.
20. Harmuth H. Characterisation of the Fracture Path in 'Flexible' Refractories. *Adv. Sci. Technol.* 2010;70:30–36.

Сведения об авторах:

Кристина Александровна Коренная, к.т.н., управляющий директор, АО «Кузнецкие ферросплавы»
E-mail: Reception.GD@kfw.ru

Андрей Сергеевич Запольский, заместитель начальника службы охраны труда и промышленной безопасности, АО «Кузнецкие ферросплавы»
E-mail: ZapolskiyAS@mail.ru

Александр Юрьевич Пронякин, к.т.н., начальник технического управления, АО «Кузнецкие ферросплавы»
E-mail: PronyakinAU@kfw.ru

Михаил Викторович Темлянец, д.т.н., профессор, проректор по реализации стратегического проекта, Сибирский государственный индустриальный университет
ORCID: 0000-0001-7985-5666
E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

SPIN-код: 6169-5458

Екатерина Михайловна Запольская, к.т.н., с.н.с. лаборатории электронной микроскопии и обработки изображений, Сибирский государственный индустриальный университет

E-mail: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Наталья Игоревна Кувшинникова, ведущий инженер, Сибирский государственный индустриальный университет

Information about the Authors

К. А. Korennaya, Cand. Sci. (Eng.), Managing Director, JSC Kuznetsk Ferroalloys

E-mail: Reception.GD@kfw.ru

Andrei Sergeevich Zapol'skii, Deputy Head of the Occupational Safety and Industrial Safety Service, JSC Kuznetsk Ferroalloys

E-mail: ZapolskiyAS@mail.ru

А. Ю. Pronyakin, Cand. Sci. (Eng.), Head of Technical Department, JSC Kuznetsk Ferroalloys

E-mail: PronyakinAU@kfw.ru

Mikhail V. Temlyantsev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Vice-Rector for Strategic Project Implementation, Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0001-7985-5666

E-mail: uchebn_otdel@sibsiu.ru

SPIN-код: 6169-5458

Ekaterina M. Zapolskaya, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University

Email: beloglazova-ekat@mail.ru

ORCID: 0000-0002-8098-5895

SPIN-код: 7302-2751

Natalia I. Kuvshinnikova, Senior Engineer, Siberian State Industrial University

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare that there is no conflict of interest.*

Поступила в редакцию 10.10.2025

После доработки 13.11.2025

Принята к публикации 17.11.2025

Received 10.10.2025

Revised 13.11.2025

Accepted 17.11.2025