



СТОЙКОСТЬ ФУТЕРОВКИ И ВЗРЫВООПАСНОСТЬ ИНДУКЦИОННЫХ ТИГЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Нуриддинов Отабек Шухрат угли

Ведущий инженер-технолог Литейно-механического завода
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Хужахмедова Холида Саидбакиевна

ст. преподаватель кафедры материаловедения и машиностроения
Ташкентского государственного транспортного университета,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

Туракулов Мурот Рустамович

ст. преподаватель кафедры «Материаловедения и
машиностроения»

Ташкентский государственный транспортный университет,
Республика Узбекистан, г. Ташкент

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18384833>

ARTICLE INFO

Qabul qilindi: 20-yanvar 2026 yil
Ma'qullandi: 24-yanvar 2026 yil
Nashr qilindi: 27-yanvar 2026 yil

KEY WORDS

индукционная тигельная печь,
футеровка, термостойкость,
трещинообразование,
взрывоопасность;
электрическая изоляция;
безопасность плавки.

ABSTRACT

В работе проанализированы механизмы разрушения футеровки индукционных тигельных печей и их влияние на формирование взрывоопасных условий. Показано, что в периклазовых набивных футеровках при многократных тепловых циклах развивается трещинообразование вследствие низкой термостойкости и объемной нестабильности материала. Образующиеся трещины обеспечивают диффузию жидкого металла и шлака вглубь футеровочного слоя, что приводит к снижению его электрического сопротивления и создает условия для проникновения расплава к водоохлаждаемому индуктору. Предложенная причинно-следственная модель описывает многостадийный механизм перехода дефектов футеровки в аварийное и взрывоопасное состояние ИТП

Срок службы футеровки индукционных тигельных печей (ИТП) существенно зависит от марок выплавляемой стали и последовательности их выплавки. Установлено, что при последовательной выплавке нескольких плавков низкоуглеродистой стали с последующим переходом к высокомарганцевым сталям износ футеровки значительно ниже по сравнению с режимом чередования указанных марок через одну плавку. Последний режим вызывает интенсивные термохимические и структурные напряжения в футеровочном материале, что ускоряет его разрушение.

Износ большинства составов периклазовой футеровки обусловлен совокупным действием эрозионных и коррозионных процессов, наиболее интенсивно протекающих в зоне зеркала металла. Существенное разрушение футеровки наблюдается при неудовлетворительном качестве связки, что может быть связано с недостаточным

содержанием тонкодисперсных фракций, плохим спеканием, дефектами набивки или разрыхлением связки в процессе обжига. Так, футеровки на основе периклаза с добавкой циркония склонны к росту при обжиге и разрыхлению структуры, вследствие чего их шлакоустойчивость ниже по сравнению с периклазовыми футеровками, модифицированными электрокорундом или кварцевым песком, что ограничивает область их применения. Важную роль в обеспечении стойкости футеровки играет чистота применяемой металлошихты, так как примеси и загрязнения способствуют интенсификации коррозионных процессов и диффузии расплавов в структуру футеровочного материала. Основная футеровка различных составов, включая футеровки из плавленного периклаза с электрокорундом, в ряде случаев характеризуется сравнительно низкой стойкостью и не всегда обеспечивает надежную и безопасную работу ИТП. Основной причиной этого является неудовлетворительная объемная стабильность и низкая термостойкость периклазовых набивных масс, особенно в печах вместимостью более 500 кг. В процессе эксплуатации длительное воздействие высоких температур, их резкие колебания, а также диффузия жидкого металла и шлака в футеровку через развивающиеся трещины в спеченной зоне приводят к углублению спекания тигля, значительным усадкам и образованию глубоких трещин. Для повышения стойкости периклазовой футеровки в ее состав вводят хромит либо применяют смеси периклазовых и периклазохромитовых компонентов. В зарубежной литературе [1] описаны футеровки ИТП вместимостью 3–10 т шпинельного состава на основе $MgO-Al_2O_3$. Стойкость таких футеровок достигает 50–150 плавов и определяется сортаментом выплавляемой стали и составом огнеупора. В периклаз вводят 20–30% плавленного корунда. Оптимальный зерновой состав шпинельных масс включает 45% крупной, 10% средней и 45% тонкомолотой фракции. Максимальный размер зерен не превышает 4 мм, при этом тонкомолотая часть полностью проходит через сито с размером отверстий $\leq 0,074$ мм, а размер зерен Al_2O_3 составляет менее 0,15 мм. В качестве добавок применяют борную кислоту, буру или B_2O_3 (1–2 %), а также глину, фосфаты или хромиты. Периклазокорундовые массы на основе обожженного и плавленного периклаза, применяемые в ИТП вместимостью 5,5–10 т, показали удовлетворительную стойкость в промышленных условиях.

Для ИТП вместимостью 6–10 т широко применяют комбинированную футеровку, включающую кирпичный слой толщиной 75–130 мм и буферный слой толщиной 20–30 мм. Футеровку выполняют из обожженных основных огнеупорных материалов. В производственных условиях срок службы основной набивной футеровки характеризуется значительными колебаниями, что подтверждается данными таблицы 1.

Таблица 1 – Срок службы футеровки ИТП различной вместимости

Вместимость, кг	Стойкость, число плавов		
	максимальная	минимальная	средняя
До 50	80	10	50
До 150	65	10	40
До 500	50	5	30
До 2500	45	5	25

Более 2500	30	5	18
------------	----	---	----

Стойкость основной футеровки, как правило, ниже стойкости кислой футеровки. Основным ее недостатком является склонность к образованию трещин, что существенно снижает надежность и безопасность эксплуатации печи. Источником повышенной взрывоопасности в ИТП является водоохлаждаемый индуктор при проникновении жидкого металла к его виткам через трещины в футеровке. Обеспечение взрывобезопасности достигается за счет строгого контроля технологического процесса, применения систем сигнализации о нарушениях режимов работы, своевременного устранения неисправностей и регулярного инструктажа обслуживающего персонала. Футеровка ИТП одновременно выполняет функции электрической и тепловой изоляции. При ее отсыревании в холодном состоянии либо насыщении электропроводящими веществами из расплава или газовой среды электрическое сопротивление футеровки резко снижается, что создает опасность поражения электрическим током. Научная новизна настоящего исследования заключается в комплексном обосновании взаимосвязи между состоянием футеровки индукционных тигельных печей и уровнем их эксплуатационной и взрывной безопасности. В работе показано, что футеровка ИТП выполняет не только функцию огнеупорного слоя, но является критически важным элементом системы электробезопасности и противоаварийной защиты печи.

Впервые в единой логической модели установлена причинно-следственная цепочка «структурная нестабильность футеровки → образование трещин → диффузия расплава → снижение электрического сопротивления → контакт металла с водой → взрыв», что наглядно представлено на рисунке 1. Данная схема позволяет рассматривать процесс разрушения футеровки не изолированно, а как развивающийся многостадийный механизм, приводящий к аварийным ситуациям. Установлено, что в основных (периклазовых) набивных футеровках, особенно в ИТП вместимостью более 500 кг, ключевым фактором снижения стойкости является неудовлетворительное объемопостоянство и низкая термостойкость материала, что приводит к интенсивному трещинообразованию в зоне спекшейся футеровки. Через образующиеся трещины происходит проникновение жидкого металла и шлака, вызывающее деградацию электрических изоляционных свойств футеровочного слоя и рост взрывоопасности. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных результатов при выборе состава футеровочных материалов и разработке эксплуатационных регламентов индукционных тигельных печей. Представленная причинно-следственная схема (рисунок 1) может быть применена в качестве инженерного инструмента для оценки рисков аварийных ситуаций, а также при разработке мероприятий по повышению безопасности плавки.

Результаты исследования позволяют обоснованно рекомендовать применение футеровок с повышенной термомеханической стабильностью (в частности, шпинельных $MgO-Al_2O_3$ систем) с целью увеличения ресурса футеровки, снижения вероятности проникновения расплава к индуктору и уменьшения риска взрывов ИТП. Причинно-следственная взаимосвязь между состоянием футеровки, процессом

трещинообразования и возникновением взрывоопасных ситуаций в ИТП представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Причинно-следственная схема влияния состояния футеровки на взрывоопасность индукционной тигельной печи

Заключение

В результате проведенного анализа установлено, что стойкость футеровки индукционных тигельных печей является одним из ключевых факторов, определяющих надежность и безопасность их эксплуатации. Основные периклазовые набивные футеровки характеризуются склонностью к образованию трещин вследствие многократных тепловых циклов, неудовлетворительного объемопостоянства и низкой термостойкости, особенно в печах вместимостью более 500 кг. Показано, что развитие трещин в спекшейся зоне футеровки способствует проникновению жидкого металла и шлака вглубь футеровочного слоя, что приводит к деградации его электрических

изоляционных свойств. В условиях эксплуатации ИТП это создает предпосылки для контакта расплава с водоохлаждаемым индуктором и возникновения взрывоопасной ситуации. Предложенная причинно-следственная схема позволяет рассматривать процесс разрушения футеровки как многостадийный механизм, напрямую связанный с риском аварий и взрывов. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения футеровок с повышенной термомеханической стабильностью, в том числе шпинельных $MgO-Al_2O_3$ систем, а также необходимость строгого контроля состояния футеровки и режимов плавки. Реализация данных рекомендаций позволяет повысить ресурс футеровки, снизить вероятность аварийных ситуаций и обеспечить более безопасную эксплуатацию индукционных тигельных печей.

Список использованных источников:

1. Кайбичева М.Н. Футеровка электропечей – М: Металлургия, 1975 г. –280 с.
2. Toirov, O. T., N. Q. Tursunov, and D. I. Nigmatova. "Reduction of defects in large steel castings on the example of" Side frame." International Conference on Multidimensional Research and Innovative Technological Analyses. 2022.
3. Тоиров, Отабек Тоир Угли, Нодиржон Каюмжонович Турсунов, and Лочинбек Ахмаджон Угли Кучкоров. "Совершенствование технологии внепечной обработки стали с целью повышения ее механических свойств." *Universum: технические науки* 4-2 (97) (2022): 65-68.
4. Тен, Э. Б., and O. T. Тоиров. "Оптимизация литниковой системы для отливки." *Литейное производство* 10 (2021): 17-19.
5. Toirov Otabek, and Nodirjon Tursunov. "Efficiency of using heat-insulating mixtures to reduce defects of critical parts." *E3S Web of Conferences*. Vol. 401. EDP Sciences, 2023.
6. Туракулов М. Р. и др. Разработка эффективной технологии получения синтетического чугуна в индукционной тигельной печи // *Universum: технические науки*. – 2022. – №. 6-2 (99). – С. 30-33.
7. Toirov, O., & Tursunov, N. (2023). Efficiency of using heat-insulating mixtures to reduce defects of critical parts. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 401, p. 05018). EDP Sciences.
8. Toirov, O., Tursunov, N., & Kuchkorov, L. (2025). Development of resource-saving composition of sand-clay mixtures for steel castings with improved physical and chemical characteristics. *Vibroengineering Procedia*, 58.