

Д. В. Рябый¹ (✉), к. т. н. А. А. Кондрукевич² (✉), к. т. н. С. В. Семирягин¹¹ ГВУЗ «ДонГТУ», г. Лисичанск, Украина² ФГБОУ ВПО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия

УДК 666.762.32.043.1.017:621.746.329.017]:620.169.1

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ЛОКАЛЬНОГО (ДЫРОЧНОГО) ИЗНОСА ПЕРИКЛАЗОУГЛЕРОДИСТОЙ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНОГО КОВША

Рассмотрены механизмы образования локального (дырочного) износа рабочего слоя периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша в конвертерном производстве. Установлены наиболее частые причины образования этого вида износа.

Ключевые слова: локальный (дырочный) износ футеровки, сталеразливочный ковш, футеровка, периклазоуглеродистый огнеупор.

Устойчивой тенденцией в металлургической отрасли является снижение себестоимости выплавляемой стали за счет оптимизации удельных затрат на футеровку металлургических агрегатов. При этом наиболее затратной статьей в формировании удельного расхода огнеупоров в сталеплавильном производстве является сталеразливочный ковш (35–45 %) [1]. Ввиду этого работы, направленные на изучение проблематики футеровки, являются актуальными.

Непрерывная трансформация металлургического комплекса в последние 7–10 лет, связанная с дифференциацией выплавляемого сортамента и модернизацией технологических агрегатов внепечной обработки стали (повышение производительности и функциональных возможностей), а также с усложнением схемы футеровки, приводит к возникновению новых видов износа футеровки сталеразливочного ковша вследствие ужесточения условий его эксплуатации. Одним из таких видов износа является локальный (дырочный) износ периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша. На рис. 1 показан «дырочный» износ рабочего слоя футеровки 160-т сталеразливочного ковша в районе шлакового пояса. Футеровка выполнена из периклазоуглеродистого огнеупора зарубежного производства укладкой «на ребро» в один ряд. Основные закономерности и характер проявления локального износа рассмотрены в статье [2].

Настоящая работа направлена на изучение развития локального (дырочного) износа

периклазоуглеродистой футеровки вследствие термомеханических нагрузок (механический характер проявления). Проявление локального износа (см. рис. 1) наблюдается преимущественно по швам между штучными изделиями в рабочем слое футеровки сталеразливочного ковша. Основной причиной такого износа служит совокупность термомеханических нагрузок в процессе эксплуатации ковша. При термическом воздействии на футеровку возникают пластическая деформация и термическое расширение, которые приводят к растрескиванию огнеупора. На процесс термомеханического образования «дырочного» износа значительно влияет этап нагрева футеровки [3].

В процессе нагрева в рабочем слое футеровки возникает градиент температур. Вследствие этого появляется термомеханическое напряжение периклазоуглеродистого огнеупора, обусловленное его объемным и линейным расширением. Эти напряжения могут различаться в радиальном направлении кладки в зависимости от глубины прогрева огнеупора от его рабочей стороны («горячая» сторона) к тыльной («холодная» сторона),



Рис. 1. Локальный (дырочный) износ периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша



Д. В. Рябый

E-mail: Ryaboiy@gmail.com

А. А. Кондрукевич

E-mail: kondrukevich@list.ru

находящейся в кладке футеровки. Некоторое влияние на это оказывает длительное воздействие высоких температур на стендах разогрева, что приводит к возникновению частично обезуглероженного слоя рабочей поверхности кладки, глубина которого зависит от качества огнеупора и длительности нагрева. Так как линейное и объемное расширение с «горячей» стороны максимально, возникают напряжения, которые вызывают образование зародышей микротрещин. Они в дальнейшем могут развиваться до крупных трещин, приводящих к сколам граней в зонах сопряжения огнеупоров кладки (рис. 2). Согласно эпюре распределения напряжений в огнеупоре (см. рис. 2), максимальное напряжение в кладке возникает с «горячей» стороны и снижается в радиальном направлении к «холодной». Если напряжения, возникающие в кольце кладки, становятся значительно больше предела прочности при сжатии огнеупора и не распределяются в радиальном направлении, то на «горячей» стороне огнеупоров в зонах сопряжения возможно образование скола. Такие напряжения не являются критическими и, как правило, не приводят к значительным сколам, однако при опережающем обезуглероживании поверхности огнеупора, контактной с агрессивной средой, они превышают предел прочности при растяжении, обеспечиваемый связкой огнеупора в переходном слое, что приводит к образованию отслоений и сколов. На дальнейшее развитие «дырочного» износа, обусловленного нагревом, уже влияет разрушение агрессивной средой за счет химической коррозии и эрозии продуктами плавки.

Напряжения, возникающие в процессе нагрева, можно компенсировать в радиальном направлении «холодной» стороны огнеупора за счет создания буферного слоя из засыпных масс, способных спекаться с некоторой усадкой, образуя компенсационный зазор. Толщина буферного слоя может колебаться в зависимости от вместимости

сталеразливочного ковша и толщины рабочего слоя футеровки и в среднем составляет 10–25 мм. Вышеуказанных дефектов можно избежать при квалифицированном проведении футеровочных работ, применении качественных огнеупоров, а также при корректировке графика сушки и разогрева сталеразливочного ковша, что позволяет снизить термомеханические напряжения.

Отмечено, что при использовании бетонных наливных армированных слоев для сталеразливочных ковшей при технологии заливки бетона за уже собранный рабочий слой также наблюдается значительный опережающий износ в зонах стыка кладки за счет «дырочного» износа, снижающего общую стойкость кампании сталеразливочного ковша на 20–30 %. Это обусловлено тем, что в процессе нагрева футеровки на новом армированном слое происходит удаление воды не только через выпарные отверстия металлического кожуха сталеразливочного ковша, но и по щелям кладки, в основном в Т-образной зоне (рис. 3). При высоких температурах сушки ($>700\text{ }^{\circ}\text{C}$) водяной пар начинает окислять тонкие фракции графита, которые, как правило, при формировании кирпича распределяются совместно с тонкими фракциями периклаза на периферии формы, т. е. на грани кирпича. Частичное обезуглероживание в данной зоне вызывает термомеханические напряжения между науглероженным и обе-

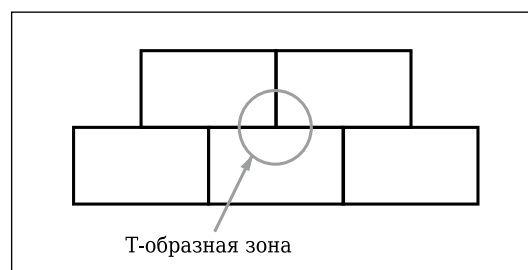


Рис. 3. Расположение Т-образной зоны кирпичной кладки

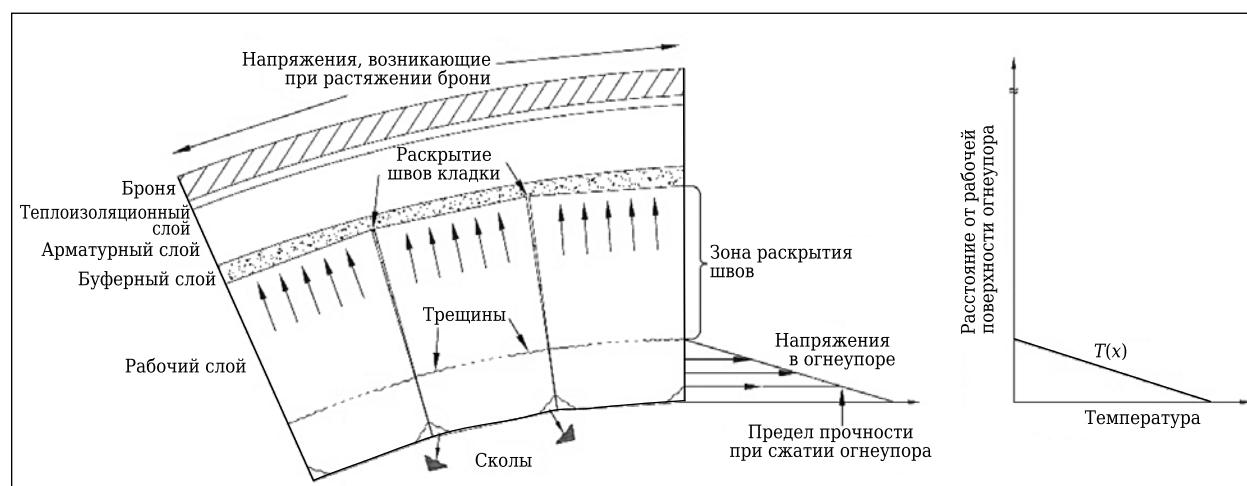


Рис. 2. Распределение напряжений и температура в кольцевой кирпичной кладке во время нагрева сталеразливочного ковша

зуглероженным слоями, интенсифицируя тем самым процесс разрушения огнеупора в виде «дырочного» износа в Т-образной зоне кладки (рис. 4).

Кроме того, на образование «дырочного» износа существенно влияет окислительный потенциал (обезуглероживание) футеровки, особенно в процессе межплавочной подготовки сталеразливочного ковша (уход за сталевыпускным и продувочными узлами). Происходит охлаждение рабочего слоя футеровки ковша до 850–950 °С (в отдельных случаях до 700 °С). Этот период характеризуется изменением объема (усадкой) рабочего слоя футеровки, что приводит к раскрытию швов кладки, а значит, к увеличению поверхности контакта огнеупора с окислительной атмосферой (кислородом воздуха). При последующем разогреве сталеразливочного ковша до температуры приема металла происходит обезуглероживание не только со стороны рабочей поверхности (поверхность, контактирующая с расплавом), но и в зонах сопряжения огнеупоров вдоль швов кладки на глубину раскрытия швов. Обезуглероженный слой огнеупора характеризуется пониженной прочностью и повышенной пористостью, поэтому способствует износу продуктами плавки именно в данной зоне [4, 5]. А при значительном «дырочном» износе в глубь кладки значительно повышается вероятность раскрытия шва со стороны арматурного слоя футеровки, которое приводит к инжекции воздуха (через выпарные отверстия) в направлении «горячей» стороны кладки и повышает вероятность прорыва металла. Следует отметить и то, что данный сценарий развития событий несет в себе большую вероятность образо-

вания аварийных ситуаций за счет непредсказуемости размывания по данной локальной зоне в толщине кирпичной кладки (см. рис. 4). Образовавшиеся пустоты условно разделяют огнеупор на две зоны: первая, или рабочая, зона расположена со стороны расплава; вторая, «тыльная» зона прилегает к арматурному слою футеровки. В процессе эксплуатации ковша с каждой последующей плавкой размывание интенсифицируется и его обнаружение уже зависит от квалификации персонала, обслуживающего сталеразливочный ковш.

Данный механизм износа подтвержден в ходе промышленного исследования (рис. 5) при демонтаже рабочего слоя футеровки сталеразливочного ковша, который был выведен из эксплуатации из-за локального износа футеровки в зоне металла со стороны слива. При этом установлены зоны наиболее частого проявления локального (дырочного) износа, т. е. зоны, в которых было зафиксировано их максимальное количество: зона падения струи металла и зоны расположения ребер жесткости.

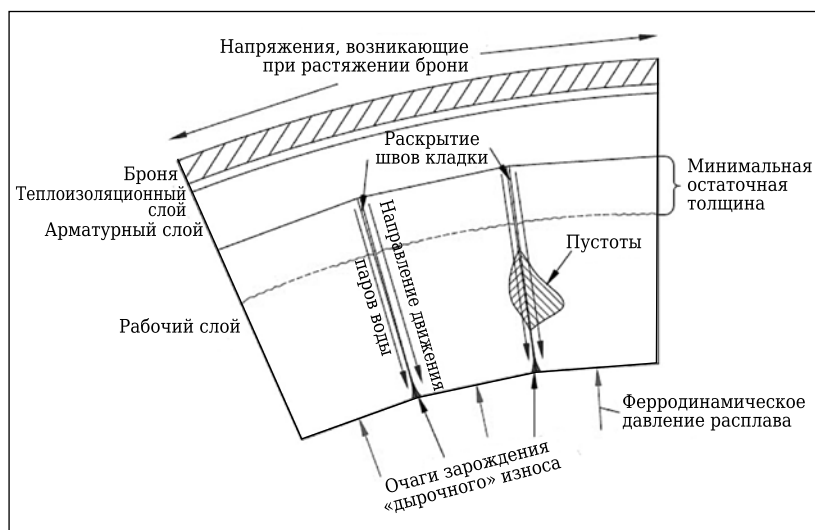


Рис. 4. Распределение напряжений и температура в кольцевой кирпичной кладке во время нагрева сталеразливочного ковша



Рис. 5. Механизм образования локального износа вследствие обезуглероживания: а — вид сверху; б — вид сбоку

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Для снижения вероятности возникновения «дырочного» износа напряжения, возникающие в процессе нагрева, можно распределить в радиальном направлении «холодной» стороны огнеупора за счет создания буферного слоя из засыпных масс, способных спекаться с некоторой усадкой, образуя компенсационный зазор. Толщина буферного слоя может колебаться в зависимости от вместимости сталеразливочного ковша и толщины рабочего слоя футеровки и в среднем составляет 10–25 мм. Вышеуказанных дефектов можно избежать при квалифицированном проведении футеровочных работ, подборе качественных огнеупоров, а также при корректировке графика сушки и разогрева сталеразливочного ковша, что позволяет снизить термомеханические напряжения.

2. При использовании технологии заливки бетонного армированного слоя за рабочий слой для снижения вероятности появления «дырочного» износа целесообразно использовать низкоцементный бетон с количеством воды затворения 4,6–5,0 %, а также увеличить диаметр выпарных отверстий на кожухе сталеразливочного ковша и, если это возможно, на его конструкции.

3. В ходе исследований были установлены зоны наиболее частого проявления локального (дырочного) износа из-за обезуглероживания рабочего слоя футеровки в процессе эксплуатации. К ним относятся: зона падения струи металла и зоны расположения ребер жесткости.

4. Для уменьшения окислительного обезуглероживания рабочей стороны кирпичной кладки необходимо исключить неорганизованные подсосы воздуха при сушке и разогреве ковша, а также осуществлять контроль параметров факела нагрева (соотношение воздух/газ).

5. Одним из методов решения проблемы возникновения «дырочного» износа может послужить применение при футеровании армированного слоя специальных шаблонов в качестве опалубки (в настоящее время на большинстве предприятий в качестве опалубки для заливки армированного слоя используют кирпичную кладку) с последующей предварительной тепловой обработкой после схватывания бетона и извлечения опалубки. Такая схема футеровки и тепловой обработки позволит избежать негативного взаимодействия рабочего слоя футеровки из штучных изделий с влагой, которая применяется при укладке бетона армированного слоя, и более равномерно прогреть армированный слой, а следовательно, увеличить эффективность тепловой обработки и полноту удаления влаги.

Библиографический список

1. **Съёмщиков, Н. С.** Разработка футеровки сталеразливочных ковшей (обзор опыта работы) / Н. С. Съёмщиков, А. А. Кондрукевич, К. Н. Бельмаз, Я. А. Минаев // Новые огнеупоры. — 2013. — № 7. — С. 3–8.
2. **Рябый, Д. В.** Изучение локального (дырочного) износа периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша / Д. В. Рябый, А. А. Кондрукевич // Новые огнеупоры. — 2016. — № 1. — С. 6, 7.
3. **Hampel, M.** Beitrag zur Eigenschaftsbewertung von feuerfesten Magnesiakohlenstoffzeugnissen : dissertation / Technische Universität Bergakademie Freiberg. — Freiberg, 2010. — 226 S.
4. **Кащеев, И. Д.** Оксидноуглеродистые огнеупоры / И. Д. Кащеев. — М. : Интернет Инжиниринг, 2000. — 265 с.
5. Огнеупоры. Технология строительства и ремонта печей ; пер. с яп. — М. : Металлургия, 1980. — 384 с. ■

Получено 29.04.16

© Д. В. Рябый, А. А. Кондрукевич,
С. В. Семирягин, 2016 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ



2016 NANOCON 19–21 октября 2016 г.

NANOCON 2016 — 8-я Международная конференция по наноматериалам — исследование и применение

г. Брно, Чешская Республика

Тематика

- Раздел А. Наноматериалы для электронных, магнитных и оптических применений.
- Углеродные наноструктуры, квантовые точки
- Раздел В. Промышленное и экологическое применение наноматериалов
- Раздел С. Бионанотехнология, наноматериалы в медицине
- Раздел D. Мониторинг и токсичность наноматериалов
- Раздел E. Современные методы подготовки и характеристика наносистем



www.nanocon.eu