

К. т. н. А. А. Кондрукевич¹ (✉), Д. В. Рябый²¹ ФГБОУ ВО «Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева», Москва, Россия² ГВУЗ «ДонГТУ», г. Лисичанск, Украина

УДК 666.762.37:[621.746.329:66.043.1

ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА СТОЙКОСТЬ РАБОЧЕГО СЛОЯ ФУТЕРОВКИ СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

Рассмотрены причины образования трещин в периклазоуглеродистом, алюмопериклазоуглеродистом и шпинелепериклазоуглеродистом огнеупорах, а также частичное влияние на стойкость порошковой проволоки и интенсивность продувки инертным газом на предприятии, выплавляющем низколегированный, углеродистый и низкокремнистый сортамент. Оборачиваемость сталеразливочного ковша более 4,5 плавки/сут; доля плавов, обрабатываемых на У КП, 100 %; разливка на МНЛЗ открытой струей. По результатам работы оценены определяющие факторы и их доля влияния на стойкость футеровки сталеразливочного ковша.

Ключевые слова: футеровка, периклазоуглеродистые (ПУ) огнеупоры, установка ковш-печь (У КП), сталеразливочный ковш, термические напряжения.

Потребности рынка и пути снижения удельных затрат на тонну готовой продукции требуют периодической дифференциации в сортаменте выплавляемых марок стали или внесения корректировок в процесс выплавки стали. Следствием этого являются изменения условий эксплуатации сталеразливочных ковшей, которые сказываются на стойкости футеровки, в 90–95 % ее рабочего слоя. Так как в настоящее время на большей части сталеразливочных ковшей, обрабатываемых на установках ковш-печь (У КП) и разливаемых на МНЛЗ, используют периклазоуглеродистые (ПУ), алюмопериклазоуглеродистые (АПУ) или шпинелепериклазоуглеродистые (ШПУ) изделия в различной компоновке, то взаимодействие отдельных компонентов этих огнеупоров с агрессивными средами (продукты плавки, атмосфера и т. д.) является определяющим фактором их стойкости.

В работе [1] рассматривается влияние на стойкость рабочего слоя футеровки сталеразливочных ковшей некоторых металлургических факторов, таких как длительность обработки металла на У КП, общее время пребывания металла в сталеразливочном ковше, среднесуточное производство, температура металла на выпуске плавки из конвертера и длительность нагрева металла на У КП. В настоящей работе исследована равностойкая дифференцированная футеровка [2] сталеразливочных ковшей,

эксплуатируемая в конвертерном цехе, выплавляющем низколегированный, углеродистый и низкокремнистый сортамент с достаточной оборачиваемостью сталеразливочного ковша — более 4,5 плавки/сут. Следует отметить, что доля плавов, обрабатываемых на У КП, 100 %, разливка на МНЛЗ осуществляется открытой струей. Кроме того, рассмотрено влияние различных эксплуатационных параметров на процессы, протекающие в огнеупорах рабочего слоя футеровки.

Для рабочего слоя футеровки стен (зоны металла и шлакового пояса) сталеразливочного ковша из углеродсодержащих огнеупоров следует отметить следующие основные агрессивные среды: атмосферный кислород воздуха и продукты плавки (металл и шлак). Для углеродсодержащих огнеупоров характерны частичное выгорание углерода в поверхностном слое на глубину примерно до 10 мм и термическое растрескивание изделий, которому подвержены в большей степени основные углеродсодержащие огнеупоры. Для предотвращения окисления углерода ПУ-, АПУ- и ШПУ-огнеупоров существует несколько методов [3]: физический (пассивация), химический, структурный, термический и атмосферный. Все эти методы в совокупности могут привести к значительному приросту стойкости футеровки (10–25 %) в процессе ее эксплуатации. В частности, при разогреве футеровки по смежным графикам с сушкой заливного бетонного доннышка сталеразливочного ковша (сушка и разогрев длятся от 44 до 60 ч) перед его вводом в эксплуатацию хорошо зарекомендовала себя технология физической защиты за счет нанесения антиокислительного покрытия. Оно позволяет минимизировать глубину обе-



А. А. Кондрукевич
E-mail: kondrukevich@list.ru

зуглероженного слоя и увеличить за счет этого стойкость на 1–2 плавки.

Часто используемый химический метод позволяет значительно снизить окисление углерода, в том числе и при длительных разогревах. При этом значительную роль играет чистота самого графита, что подтверждается результатами исследований. Были подготовлены образцы ПУ-изделий (с ребром 80 мм) с равным содержанием чешуйчатого графита (10 %) и размером зерен 30–120 мкм. Различие образцов состояло в качестве графита: в образце 1 содержание основного компонента в графите составляло 94 %, в образце 2 — 95 %, в образце 3 — 96 %, в образце 4 — 97 %. Все образцы обжигали в окислительной среде ($\alpha > 1,1$) при 1680 °С в течение 4 ч. После обжига измеряли размер обезуглероженного слоя, линейные изменения по граням и потери массы образцов. Установлено, что с повышением качества графита от 94 до 97 % толщина обезуглероженного слоя сокращается в 3,3–5,8 раза (табл. 1), линейное изменение и потери массы снижаются от 3,69 до 1,94 % и от 5,0 до 3,48 % соответственно (рис. 1). Поэтому использование более чистого графита с оптимальным зерновым составом позволяет значительно снизить толщину обезуглероженного слоя. В некоторых случаях при использовании схемы футеровки сталеразливочных ковшей с кирпичным дном уменьшение глубины обезуглероженного слоя кладки достигается термическим методом за счет снижения продолжительности нагрева ковша до 14–24 ч.

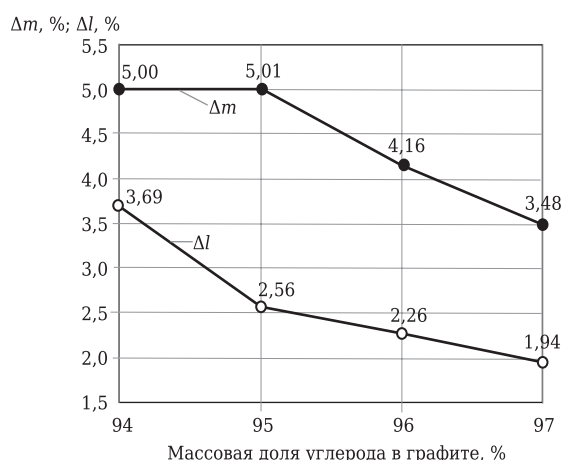


Рис. 1. Потери массы Δm и линейные изменения Δl образцов ПУ-огнеупоров

Таблица 1. Влияние качества чешуйчатого графита на толщину обезуглероженного слоя образца ПУ-изделий с содержанием графита 10 %

Образец	Массовая доля основного компонента (графита), %	Толщина обезуглероженного слоя, мм
1	≥ 94,0	20–23
2	≥ 95,0	17–19
3	≥ 96,0	7–11
4	≥ 97,0	4–6

В процессе нагрева, эксплуатации и охлаждения футеровки сталеразливочного ковша ПУ-огнеупор в кладке испытывает значительные термомеханические напряжения [4, 5], которые приводят к образованию трещин, сколов, отслоений, что вызывает снижение срока службы огнеупора. Первые термомеханические напряжения возникают в ПУ-огнеупорах при нагреве футеровки (тепловой режим нагрева). Эти напряжения обусловлены объемным и линейным расширением изделий, которое в радиальном направлении в зависимости от глубины прогречности огнеупора от «горячей» стороны к «холодной» может различаться. Некоторое влияние на этот процесс оказывает длительное воздействие высоких температур на стендах разогрева, что приводит к возникновению частично обезуглероженного слоя рабочей («горячей») стороны кладки, глубина которого зависит от качества огнеупора и длительности нагрева. Так как линейное и объемное расширение с «горячей» стороны огнеупора максимально, возникают напряжения, которые вызывают образование зародышей микротрещин. В дальнейшем они развиваются до крупных трещин, приводящих к сколам граней в зонах сопряжения огнеупоров кладки (рис. 2, а [4, 5]). Согласно эпюре распределения напряжений в огнеупоре (см. рис. 2, а) максимальное значение напряжений 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 огнеупора в зонах сопряжения возможно образование скола (см. рис. 2, а, 3). Эти напряжения не являются критическими и, как правило, не приводят к значительным сколам, однако при опережающем обезуглероживании контактной поверхности огнеупора они приводят к образованию отслоений и сколов (см. рис. 2, а, 3). На образование трещин за счет термических напряжений в период нагрева и эксплуатации влияет также количество чешуйчатого графита (рис. 4 [6]): чем выше его количество, тем у изделия более термостойкая структура.

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 рабочей футеровки и в среднем составляет 10–25 мм. Вышеуказанных дефектов можно избежать при квалифицированном проведении футеровочных работ и высоком качестве огнеупоров.

После нагрева футеровки тепловой поток становится более постоянным, что создает равномерное распределение напряжений, возникающих в огнеупорах (стационарный тепловой режим). Соответственно, в данном случае определяющую роль играет объемное расширение, которое является характеристическим (рис. 2, б [4]). Напряжения, возникающие в результате этого, также компенсируются буферным слоем. При этом на контактную поверхность огнеупора действует новая агрессивная среда — продукты плавки (сталь и шлак). Взаимодействие ПУ-огнеупоров с агрессивной средой достаточно изучено [7–9]. Наиболее характерное — опережающий износ за счет обезуглероживания контактной поверхности (рис. 5), что зачастую обусловлено качеством графита и антиоксиданта. Значительное влияние оказывают ковшевая обработка стали, введение кальций-содержащей проволоки и интенсификация продувки на стойкость ПУ-изделий, что будет рассмотрено ниже.

Окончательным этапом, при котором возникают значительные термические напряжения, является охлаждение (тепловой режим охлаждения). В этот период объемные и линейные

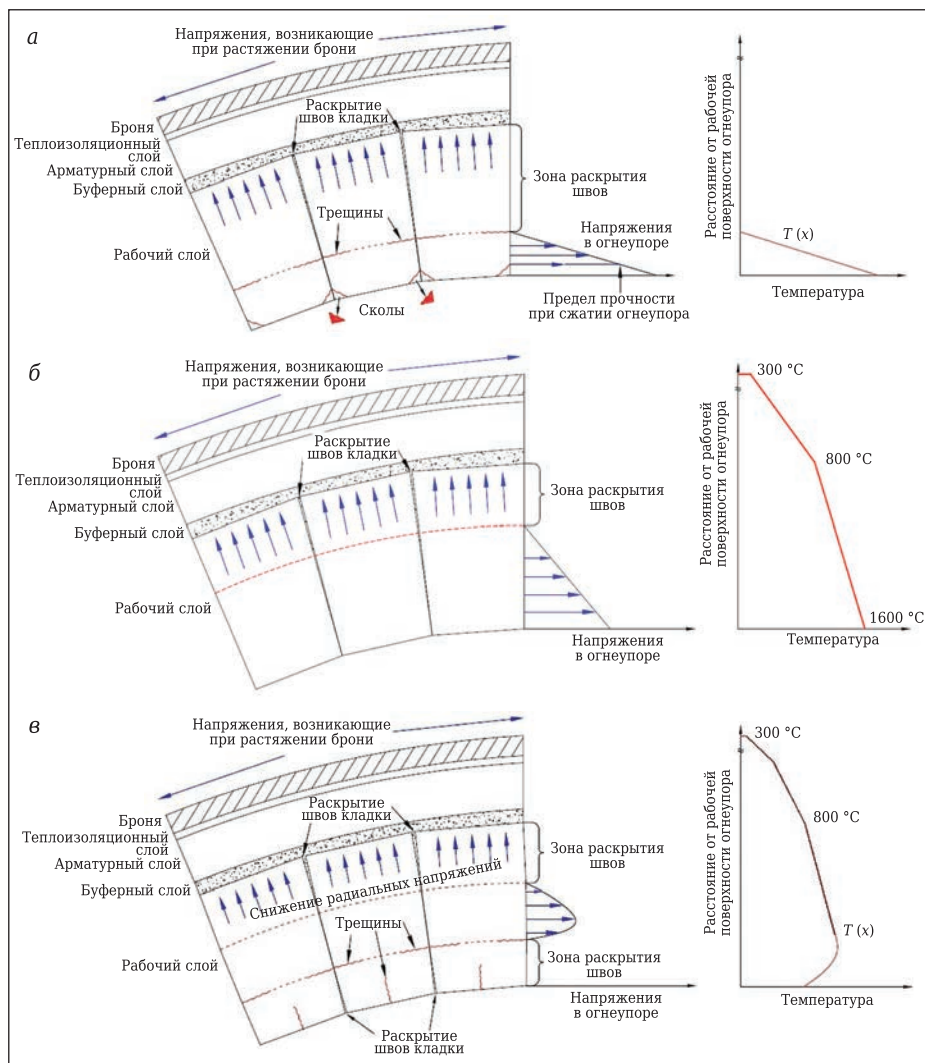


Рис. 2. Распределение напряжений и температура в кольцевой кирпичной кладке: а — во время нагрева сталеразливочного ковша; б — при стационарном режиме работы сталеразливочного ковша; в — во время остывания сталеразливочного ковша

расширения изделий, различающиеся в радиальном направлении в зависимости от глубины прогрева огнеупора от «горячей» стороны к «холодной», значительны. Они обусловлены высокой температурой и присутствием значитель-

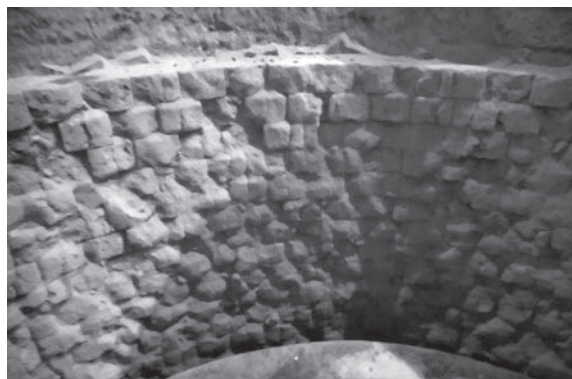


Рис. 3. Рабочий слой ПУ-футеровки зоны металла с характерными сколами

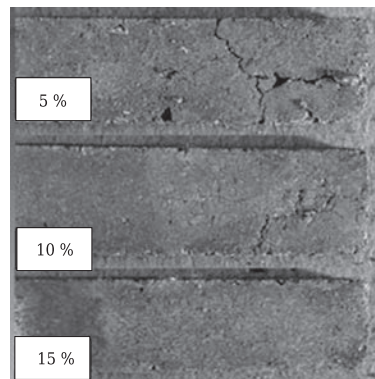


Рис. 4. Влияние содержания графита на образование трещин в образцах ПУ-огнеупора

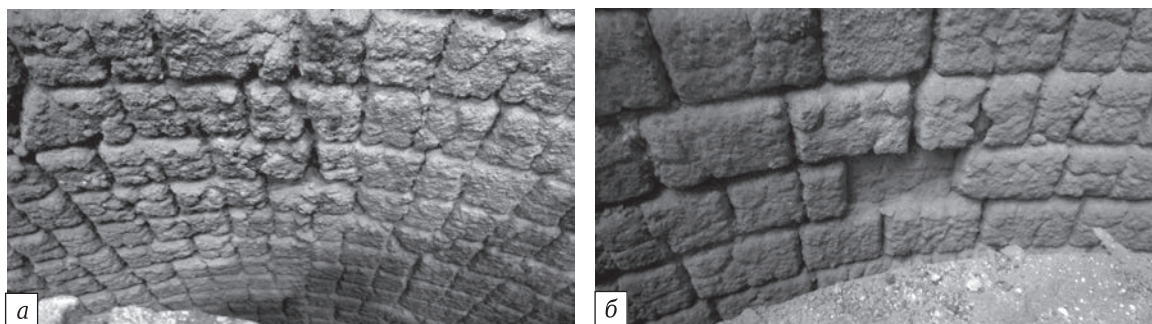


Рис. 5. Рабочий слой ПУ-футеровки зоны металла с трещиной по торцу (а, б)

ного диффузионного слоя, как обезуглероженного, так и частично пропитанного продуктами плавки. Как правило, это отражается в раскрытии швов с «горячей» стороны и вертикальными трещинами по торцу огнеупора (см. рис. 5, а и 2, в [4]). Возможны также сколы торцевых поверхностей огнеупора (см. рис. 5, б) из-за образования трещин в толщине огнеупора при возникновении предельных напряжений (см. рис. 2, в) в толщине огнеупора, вызванных разницей линейных и объемных расширений охлаждаемого обезуглероженного и необезуглероженного слоев с «горячей» стороны.

В этой связи важной задачей является максимально поддерживать рабочий слой футеровки в стационарном тепловом режиме, устраняя все возможные охлаждения, в том числе при замене элементов шибера и продувочных узлов. Пути достижения этого в значительной мере отражены в публикациях [2, 9]. При этом следует отметить, что важнейшим является проведение горячего ремонта шибера и продувочных узлов и торкретирования шлаковых поясов. Влияние некоторых металлургических факторов на стойкость рабочего слоя футеровки при стационарном тепловом режиме описано в литературе [1, 9]. В настоящей статье отражен частный случай влияния порошковой проволоки (FeCa) и интенсивности обработки плавки аргоном на стойкость ПУ-огнеупоров.

Ковшечная обработка стали введением кальция преследует несколько основных задач:

1. Модифицирование природы включений и улучшение качества стали при разливке. Введение кальция в жидкую сталь трансформирует

твердые глиноземистые включения в жидкие включения алюмината кальция.

2. Образование глобулярных включений, которые остаются глобулярными и во время горячей прокатки стали.

3. Раскисление металла при низких концентрациях кислорода.

4. При избыточном добавлении порошковой проволоки с наполнителем из кальцийсодержащего материала — частичная десульфурация стали.

Продувка аргоном плавки позволяет обеспечить максимальное перемешивание металла для гомогенизации состава и удаления неметаллических включений в шлак. При этом оба параметра по-своему влияют на компоненты ПУ-огнеупора, определяя его износ. В промышленных условиях на нескольких этапах (табл. 2) эксплуатации футеровки анализировали взаимосвязь этих двух металлургических факторов и стойкости футеровки в зависимости от химического и морфологического составов ПУ-огнеупоров. Выделены два периода: 1 — включающий этапы испытаний от 1-го до 3-го (см. табл. 2) при использовании футеровки типа 1; 2 — включающий 4-й этап испытаний (см. табл. 2) при использовании футеровки типа 2. Каждый этап по-своему был определен производственной необходимостью, в частности:

1-й этап — исходный с футеровкой типа 1;

2-й этап обусловлен снижением себестоимости за счет расхода порошковой проволоки и интенсификации обработки аргоном плавки. Используется футеровка типа 1 без антиоксиданта в огнеупорах;

3-й этап направлен на увеличение производственной программы и, как следствие, на

Таблица 2. Взаимосвязь некоторых металлургических факторов и стойкости рабочего слоя футеровки сталеразливочного ковша

Этап испытаний	Среднее время пребывания металла в сталеразливочном ковше, мин	Оборачиваемость сталеразливочного ковша, плавки/сут	Средняя интенсивность обработки плавки аргоном, $\text{дм}^3/\text{мин}$	Средний расход порошковой проволоки (FeCa), м/т	Средняя стойкость рабочего слоя футеровки, плавки
1-й	142,5	5,08	146,67	3,22	79,75
2-й	142,0	5,11	298,37	2,82	79,22
3-й	133,2	6,00	581,85	2,41	70,04
4-й	130,4	6,03	488,33	2,11	74,85

снижение времени пребывания плавки в сталеразливочном ковше за счет интенсификации обработки плавки аргоном. Используется тип футеровки 1 без антиоксиданта в огнеупорах;

4-й этап — использование футеровки типа 2 при сохранении металлургических параметров эксплуатации 3-го этапа, но с введением в огнеупоры антиоксиданта.

Из полученных данных следует, что при снижении расхода порошковой проволоки с наполнителем из FeCa от 3,2 до 2,8 м/т и повышении интенсивности обработки плавки аргоном от 140–160 до 280–300 дм³/мин стойкость сохраняется на уровне 80 плавков для футеровки типа 1. После значительной интенсификации продувки для ускорения обработки плавки выявлено, что при использовании футеровки типа 1 происходит опережающий износ рабочего слоя футеровки стен в зоне металла. Причина этого связана с тем, что в процессе продувки плавки аргоном свободный кислород взаимодействует с рабочей поверхностью огнеупора зоны металла, обезуглероживая тем самым диффузионный слой.

На 3-м этапе при увеличении производственной программы на 5 % было сокращено среднее время пребывания металла в сталеразливочном ковше на 6,3 % за счет интенсификации обработки плавки на У КП и повышения скорости разливки на МНЛЗ. Это было достигнуто за счет роста интенсивности обработки плавки аргоном до 500–600 дм³/мин (см. табл. 2) и сохранения расхода порошковой проволоки на уровне 2,1–2,4 м/т. Этот фактор негативно сказался на стойкости рабочего слоя футеровки типа 1, что выразилось в ее опережающем износе, локальных сколах, визуальном в их «рваном» характере и снижении средней стойкости до 70 плавков. Футеровка на 56-й плавке показана на рис. 6, а, топография ковша после кампании 67 плавков — на рис. 7, а.

Увеличение интенсивности обработки плавки аргоном до 600 дм³/мин при футеровке типа 1 без добавки в огнеупор антиоксиданта приводит к тому, что при эксплуатации футеровки кальций уже не оказывает такого влияния

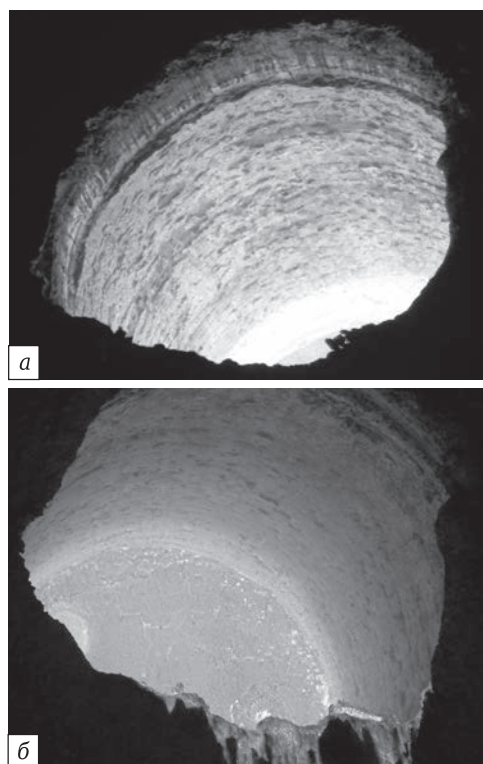


Рис. 6. Рабочий слой футеровки сталеразливочных ковшей по типам 1 (а, на 56-й плавке) и 2 (б, на 58-й плавке)

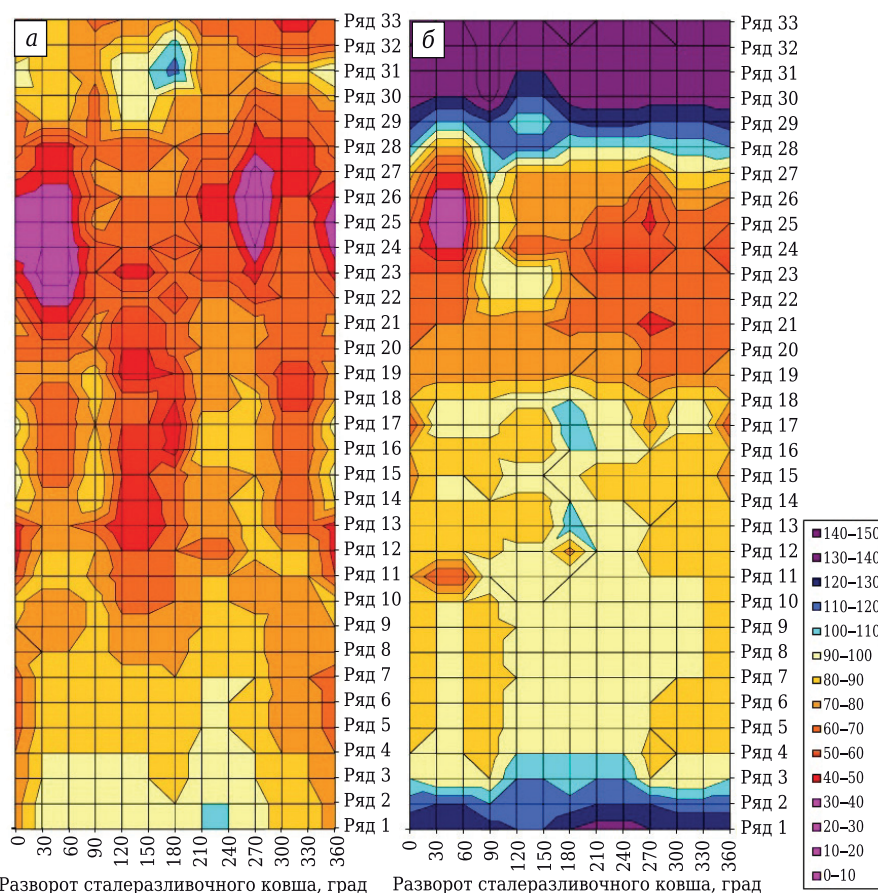


Рис. 7. Топография износа футеровки сталеразливочных ковшей по типам 1 (а, после 67-й плавки) и 2 (б, после 81-й плавки)

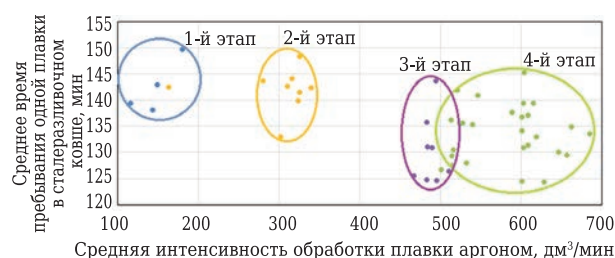


Рис. 8. Связь среднего времени пребывания одной плавки в сталеразливочном ковше и средней интенсивности обработки плавки на разных этапах испытаний

на оксиды алюминия и магния в огнеупоре, но из-за отсутствия антиоксиданта в процессе продувки интенсифицируются перемешивание и массоперенос свободного кислорода в стали, в том числе и взаимодействие контактной поверхности огнеупора зоны металла. Это приводит к окислению углерода, создавая в огнеупоре напряжения, обусловленные разницей ТКЛР между слоем огнеупора, содержащим углерод, и обезуглероженным слоем. Это выражается в сколах диффузионного слоя рабочей поверхности огнеупора зоны металла, приводя к опережающему износу изделия.

Для продолжения работы в изменившихся условиях была испытана футеровка типа 2 с антиоксидантом, позволившая в условиях сохранения среднего времени пребывания металла в сталеразливочном ковше на уровне 130–135 мин (рис. 8) и интенсивности обработки плавки аргоном в интервале 500–600 дм³/мин (рис. 9) увеличить среднюю стойкость от 70 до 75 плавков. Футеровка на 58-й плавке показана на рис. 6, б, топография ковша после кампании 81 плавки — на рис. 7, б. При этом антиоксидант Al окисляется до Al_2O_3 , защищая тем самым углерод от окисления, но при значительном избытке растворенного кальция в стали (за счет высокого расхода кальцийсодержащей проволоки — более 2 м/т) он взаимодействует с глиноземистыми включениями, образующимися в диффузионном слое огнеупора, формируя широкий спектр алюминатов кальция. Алюминаты кальция переходят в жидкую фазу и насыщают сталь неметаллическими включениями, приводя к разрушению контактного слоя огнеупора. Поэтому необходима оптимизация расхода кальцийсодержащей проволоки.

Следует отметить, что при увеличении интенсивности обработки плавки аргоном от 150–350 до 460–680 дм³/мин средняя стойкость рабочего слоя ПУ-футеровки снижается от 80 до 70 плавков (см. рис. 9) по полиномиальной зависимости с достаточно высокой степенью корреляции 0,95. Это позволяет выделить оптимальный режим продувки плавки аргоном на уровне 450–480 дм³/мин со снижением удельного расхода порошковой проволоки на 34 % — от 3,2 до

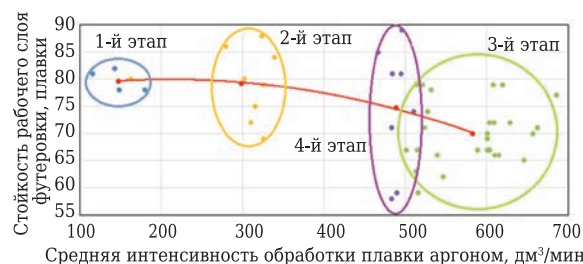


Рис. 9. Влияние средней интенсивности обработки плавки аргоном на стойкость рабочего слоя футеровки

2,1 м/т и разработать сбалансированную равностойкую футеровку для данных условий без повышения удельных затрат.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Во время эксплуатации рабочего слоя ПУ-футеровки сталеразливочных ковшей толщина обезуглероженного слоя меньше у изделий с более качественным графитом, так как с повышением качества графита от 94 до 97 % толщина обезуглероженного слоя сокращается в 3,3–5,8 раза, а линейное изменение и потери массы снижаются от 3,69 до 1,94 % и от 5,0 до 3,48 % соответственно.

2. Для достижения максимальной стойкости, исходя из оценки термических напряжений в ПУ-футеровке, целесообразно поддерживать ее в стационарном тепловом режиме. Это достигается оборотом сталеразливочного ковша и проведением горячего ремонта [2] шибера и продувочного узлов, а также локальным горячим торкретированием наиболее изнашиваемых участков футеровки.

3. При оценке топографии футеровки сталеразливочных ковшей следует обращать внимание на природу трещин, сколов, которые могут образовываться при разных тепловых режимах ее эксплуатации (нагрева, стационарный и охлаждения).

4. Установлено, что с увеличением интенсивности обработки плавки аргоном от 150–350 до 460–680 дм³/мин средняя стойкость рабочего слоя ПУ-футеровки 160-т сталеразливочных ковшей снижается от 80 до 70 плавков.

Библиографический список

1. **Коваленко, А. Г.** Влияние металлургических факторов на стойкость рабочей футеровки сталеразливочных ковшей / А. Г. Коваленко, Д. В. Рябый, А. Н. Смирнов [и др.] // Металл и литье Украины. — 2016. — № 11/12 (282/283). — С. 14–17.
2. **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.

3. **Хорошавин, Л. Б.** Магнезиальные огнеупоры / Л. Б. Хорошавин, В. А. Перепелицын, В. А. Кононов. — М. : Интермет Инжиниринг, 2001. — 576 с.
4. **Michael Hampel.** Beitrag zur Eigenschaftsbewertung von feuerfesten Magnesiakohlenstofferzeugnissen : Dissertation / Technische Universität Bergakademie Freiberg. — Freiberg, 2010. — 226 S.
5. **Рябый, Д. В.** Механизм образования локального (дырочного) износа периклазоуглеродистой футеровки сталеразливочного ковша / Д. В. Рябый, А. А. Кондрукевич, С. В. Семирягин // Новые огнеупоры. — 2016. — № 9. — С. 3–6.
6. Wonjin Group Introduction. Презентация компании Wonjin Refractories, версия 45, 2009 г.
7. **Кащеев, И. Д.** Оксидноуглеродистые огнеупоры / И. Д. Кащеев. — М. : Интермет Инжиниринг, 2000. — 265 с.
8. **Очагова, И. Г.** Влияние антиоксидантов на свойства периклазоуглеродистых огнеупорных изделий / И. Г. Очагова // Новости черной металлургии за рубежом. — 1997. — № 2. — С. 146–152.
9. **Стариков, В. С.** Огнеупоры и футеровки в ковшевой металлургии / В. С. Стариков, М. В. Темлянцева, В. В. Стариков. — М. : МИСиС, 2003. — 328 с. ■

Получено 12.05.17

© А. А. Кондрукевич, Д. В. Рябый, 2017 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

VIII Научно-практическая конференция «Актуальные проблемы огнеупорного производства»



Ассоциация производителей и потребителей огнеупоров «Санкт-Петербургский научно-технический центр» приглашает Вас принять участие в ежегодной VIII Научно-практической конференции «Актуальные проблемы производства огнеупоров», которая состоится 26–27 октября 2017 г. в Санкт-Петербурге.

На конференции традиционно представлены несколько блоков докладов, представляющих практический интерес:

- метрологическое обеспечение производства и деятельности лабораторий, а также других вопросах по этой тематике (докладчики – метрологи, специалисты ведущих профильных организаций);
- современные разработки в области огнеупоров (докладчики – представители научных организаций);
- стандартизация и информационное обеспечение в области огнеупоров (докладчики – разработчики стандартов, представители ТК 009 «Огнеупоры» и организации распространители НД);
- обучение специалистов, повышение квалификации (докладчики – представители Санкт-Петербургского государственного технологического института);
- технологическое и лабораторное оборудование (докладчики – предприятия-изготовители оборудования и представители компаний-поставщиков).

Отдельный блок докладов посвящен проблемам, связанным с производством огнеупоров и оценкой их качества у изготовителя и потребителя. Докладчиками в этом блоке являются представители огнеупорных и металлургических предприятий, при этом в рамках конференции создаются благоприятные условия для дискуссий и налаживания взаимопонимания между сторонами.

Просим рассмотреть возможность участия в конференции представителей Вашего предприятия. Сведения об Ассоциации Вы можете получить на сайте www.ogneupor-spb.ru