

тейное производство и металлургия 2016. Беларусь : Тр. 24-й Международн. науч.-техн. конф., Минск, 19–21 октября 2016 г. / БНТУ. – Минск, 2016. – С. 144–151.

3. Лисиенко, В.Г. Сооружение промышленных печей. Проектирование плавильных комплексов: Справочное издание. Кн. 2, т. I / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под. ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2006. – 755 с.

4. Сосонкин, О.М. Применение искусственного охлаждения кладки сталеплавильных печей в условиях низкой производительности / О.М. Сосонкин // Труды пятого конгресса сталеплавильщиков. – М.: ОАО «Черметинформация», 1999. – С. 184–185.

5. New cooling panels for reduction of heat losses in EAF steelmaking / J. Borlee [et. all] // Report EUR 22404 Technical steel research series, Luxembourg, 2006. – 85 pp.

6. Национальный Интернет-портал Украины [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://roud.com.ua>. – Дата доступа: 01.08.2016.

УДК 669

**С.В. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук,
И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук (БНТУ)**

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПОДИНЫ И ВАННЫ В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ

Введение. При расчете тепловых балансов электродуговых печей и оценке эффективности их работы наибольшую трудность представляют расчеты тепловых потерь через ограждающие конструкции печи, а также теплоты, аккумулированной футеровкой печи.

В литейном производстве для электродуговых печей малой емкости широко применяются как кислые, так и основные огнеупоры. Основные огнеупоры применяются при необходимости дефосфорации и десульфурации расплава в печи. В других случаях возможно применение кислых огнеупоров, которые позволяют уменьшить затраты на футеровку печи, так как эти огнеупоры имеют большую стойкость и меньшую стоимость. Кроме того, данные материалы

имеют меньшие значения коэффициентов теплопроводности (для кислых в среднем $\lambda = 1,64$ Вт/(м·К), а для основных $\lambda = 5,59$ Вт/(м·К)) и удельной теплоемкости ($0,29$ Вт·ч/(м³·К) против $0,35$ Вт·ч/(м³·К) у основных) [1].

Так как подина печи практически все время находится в нестационарном состоянии, то тепловой поток может быть значительно большим, чем рассчитанный для многослойной стенки в условиях стационарной теплопроводности. При этом аккумулированная энергия может использоваться в начальный период плавки либо безвозвратно теряться при простоях печи.

Например, среднее расчетное значение теплового потока за период $\eta = 1$ ч составило для подины из основных материалов 60 кВт/м², для кислой подины – $24,5$ кВт/м². Это свидетельствует о том, что потери на нагрев подины в случае основной футеровки в $2,45$ раза больше, чем кислой.

Особенностью высокоомощных металлургических электродуговых печей является использование основных огнеупорных материалов.

Конструктивное исполнение ванн электродуговых печей. В настоящее время высокоомощные производительные электродуговые печи имеют два вида ограждающих конструкций: нижняя огнеупорная часть или ванна печи и верхний водоохлаждаемый корпус из трубчатых панелей. Огнеупорная часть включает стены, подину, рабочее окно, выпускное отверстие, продувочные узлы.

Футеровка стен ванны делится на три участка: нижняя часть, контактирующая с жидким металлом; средняя часть, контактирующая со шлаком (шлаковый пояс) и верхняя часть, подвергающаяся действию излучения дуг. Футеровка всех участков состоит из арматурного и рабочего слоя. Арматурный слой изготавливают из обожженного периклазового кирпича без углерода с применением периклазосодержащего порошка мертеля.

При футеровке рабочего слоя используют периклазоуглеродистые огнеупоры с остаточным содержанием углерода 5 – 17 %. Горячие зоны футеруют периклазоуглеродистыми огнеупорами с остаточным содержанием углерода 10 – 15 % и долей плавленного периклаза более 50 % [2].

В верхней части стен между кирпичными стенами и водоохлаждаемыми панелями или холодильниками используют набивную магнезиальную массу.

Для рабочего слоя футеровки подины применяют периклазовые или периклазизвестковые (75 % MgO и 20 % CaO) набивные массы.

Футеровка ванны печи работает в условиях резких колебаний температуры, больших тепловых нагрузок, механического и химического воздействия.

Для отделения окисленного шлака от металла в современных дуговых сталеплавильных печах используют эркерные устройства. В подине обычно имеется три отверстия с креплениями для установки продувочных пробок.

Типовая схема подины дуговой сталеплавильной печи с эркерным выпуском металла приведена на рисунке 1.

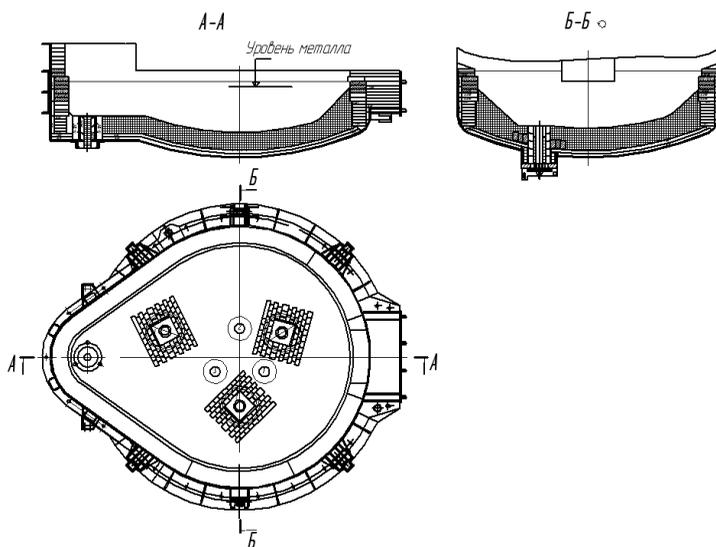


Рисунок 1 – Конструкция подины современной электродуговой печи

Подина, являющаяся основанием футеровки, работает в сложных тепловых и механических условиях. На подину укладывается при загрузке шихта, подина испытывает резкие температурные колебания, удары и давление. При перемешивании жидкой ванны подина

подвергается размывающему действию расплавленной стали. Кроме того, подина должна иметь тепловое сопротивление, достаточное для того, чтобы обеспечить минимальный температурный перепад по глубине ванны.

Стойкость подины как кислых, так и основных печей достигает 1500 и более плавков (при систематической очистке и подварке после каждой плавки). Толщина набивного слоя подины составляет 150 мм у небольших печей и доходит до 250–300 мм у крупных.

Большой срок службы подины обеспечивают тем, что после каждой плавки ее (и откосы) заправляют магнезитовым порошком с небольшими добавками. Попадая на раскаленную поверхность подины, эта масса приваривается к ней, и первоначальная конфигурация подины восстанавливается.

Огнеупоры для электрической дуговой печи (ЭДП) сталеплавильного производства выбираются в зависимости от условий эксплуатации и конструктивных особенностей печи, которые влияют на производительность. Эти условия эксплуатации требуют химически основных огнеупорных изделий с отличной устойчивостью к воздействию высоких температур и термоциклирования. Особенности технологии электроплавки требуют специальных огнеупорных футеровок. Использование дополнительных кислородных фурм и горелок для увеличения скорости плавления приводит к тому, что кислород, направленный от фурм или горелок, может быть отклонен шихтовыми материалами и удариться об огнеупорную футеровку, что приводит к локализованному перегреву и быстрому износу огнеупоров.

Даже с учетом индивидуальных различий условий эксплуатации и особенностей печи ЭДП можно разбить на отдельные зоны, которые имеют различные требования к огнеупорному материалу.

Зона ванны ЭДП содержит расплавленную сталь при высокой температуре и должна противостоять воздействию тяжелых шихтовых материалов. Кроме того подина должна выдерживать коррозию расплавленного шлака при сливе металла. В типичной ЭДП используется два слоя огнеупорного материала: приблизительно 23 см из магнезитового кирпича в качестве предохранительного (арматурного) слоя, укладываемого на стальной кожух, и слоя от 30 до 60 см из монолитного магнезита в качестве рабочего слоя. Кирпичи арматурного слоя должны содержать 90–97 % MgO. Эти кирпичи обла-

дают прочностью и устойчивостью к шлаку с учетом маловероятности проникновения стали или шлака через монолитную рабочую футеровку. Кирпичи арматурного слоя функционируют в качестве постоянного слоя и заменяются нечасто (как правило, каждый год или два).

Материал монолитного пода представляет собой продукт с высоким содержанием оксида магния (60–95 % MgO) в виде сухого гранулированного материала. Гранулометрия материала пода позволяет легко уплотнить его с помощью вибрационного оборудования во время установки. Высокие температуры от начальной плавки стали приводят к спеканию-склеиванию, уплотнению и укреплению в монолитной подине, и ванна становится достаточно прочной и устойчивой от проникновения через нее металла и шлака. Слой разработан таким образом, что примерно в верхней трети толщины монолитного материала он полностью спечен, в то время как средняя треть слоя лишь частично спечена, а в нижней трети монолитного материала, контактирующей с арматурным слоем футеровки, она не спеченная. Этот эффект способствует латанию огнеупоров пода, когда сталь или шлак повреждает подину посредством проникновения или коррозии. Поврежденный участок можно очистить путем удаления пропитанного, спеченного магнезита и отремонтировать новым набивным материалом, который спекается в месте формирования заплатки.

Шлаковый пояс электродуговых печей является переходной зоной между ванной и верхней боковой стенкой. Эта зона подвергается воздействию высоких температур электрической дуги, а также окисления и пламени, от введения дополнительного кислорода, и, самое главное, агрессивного воздействия шлака. Шлаковый пояс представляет собой сочетание кирпича и монолитных изделий. Наиболее распространенным является шлаковый пояс толщиной от 30 до 46 см, с использованием магнезито-углеродного кирпича с 10–20 % содержанием углерода. Фаза углерода кирпича состоит из графита и углеродсодержащего связующего. Эти углеродные материалы обладают высокой стойкостью к воздействию сталеплавильных шлаков и отлично противостоят высоким температурам. Тем не менее, углерод чувствителен к окислению. Часто для защиты углерода от окисления в кирпичи шлакового пояса добавляют порошковый металлический алюминий, кремний, магний. Эти металлы

в сочетании с углеродом образуют карбиды, которые более устойчивы к окислению и усиливают способность кирпичей противостоять эрозионному воздействию расплавленного шлака и стали. Магнезито-углеродистые кирпичи в шлаковом поясе дополнительно защищены огнеупорными массами. В процессе эксплуатации этот материал корродирует или быстро разрушается из-за сложных условий эксплуатации в этой зоне печи. Дополнительная защита для шлакового пояса должна заменяться через регулярные промежутки времени в зависимости от тяжести условий эксплуатации.

Верхняя зона ванны дуговых электропечей выкладывается из магнезито-графитового кирпича аналогичного качества для кирпича, используемого в шлаковом поясе. Верхняя боковая стенка подвергается интенсивному излучению дуг (очень высокие температуры) и соударению с тяжелым ломом во время процесса загрузки. Во время процесса выпуска, когда печь наклоняется, расплавленная сталь и шлак контактирует с верхней кирпичной стеной на стороне для выпуска стали.

В электродуговых печах переменного тока, которые имеют горячие области в верхней боковой стенке, в этих зонах используют кирпич более высокого качества. Такие кирпичи изготавливают на основе плавного, а не спеченного магнезита, что улучшает сопротивление материала при высоких температурах, однако они имеют более высокую стоимость.

Механизмы износа огнеупоров в печи. Существуют различные механизмы износа огнеупорных материалов, а общий износ MgO-C кирпича в ЭДП объясняется следующими факторами:

- эрозия от потоков стали и шлака, а иногда и струй от кислородных фурм и горелок;
- химический износ или коррозия из-за растворения MgO из материала, особенно в случае определенного состава технологического шлака при высокой температуре;
- окисление и потеря углерода связующих в результате избыточного ввода кислорода из фурм или в результате реакции с FeO шлака;
- отслаивание или выкрашивание в результате термического стресса;
- гидратация при контакте с парами воды.

Неэкранированная электрическая дуга часто создает на поверхности огнеупоров температуры, которые превышают пределы точки плавления всех огнеупоров. При плавлении поверхности огнеупоров она переходит в жидкое состояние, а жидкая фаза легко вымывается. Эрозия является одним из самых распространенных механизмов износа огнеупоров и представляет собой физическое изнашивание огнеупора из-за расплавленной стали или шлака, движущихся по поверхности огнеупорной футеровки и физически отшлифовывающих или размывающих поверхность. Эрозия является наиболее распространенным процессом в зоне леток и шлакового пояса.

Реакции коррозии могут быть сведены к минимуму путем нейтрализации FeO с флюсами и контроля содержания кислорода в шлаке. Другим способом борьбы с коррозией является использование огнеупорного кирпича, который содержит углерод. Этот углерод в огнеупорной футеровке раскисляет коррозионный шлак на границе шлак–огнеупор, сводя к минимуму коррозию слоя.

Вторым важнейшим механизмом износа футеровки в дуговой электропечи является окисление. Углерод в огнеупорной футеровке окисляется путем реакции с кислородом или FeO в шлаке. Так как углерод, содержащийся в огнеупорной футеровке, вступает в реакцию, кирпич теряет свою прочность и вымывается. Этот механизм окисления углерода также происходит и на относительно холодной поверхности кирпича.

Поскольку в современных электродуговых печах широко используется охлаждающая вода, то могут быть случайные утечки воды. Огнеупоры легко могут быть повреждены водой или паром из-за гидратации окиси магния или фаз окиси кальция в огнеупорном материале. Результаты гидратации заключаются в расширении отдельных зерен футеровки. Эти зерна увеличиваются и лопаются, разрушая оболочку.

Более тонкий механизм износа огнеупоров известен как сколы. В этом типе износа быстрый нагрев или охлаждение огнеупорной футеровки вызывают напряжения в огнеупорной футеровке. Возникающие напряжения часто превышают прочность огнеупорного материала, что приводит к образованию трещин. Поскольку эти трещины пересекаются, куски огнеупора постепенно выпадают из слоя.

Направления повышения эффективности эксплуатации подины высокоомощных электродуговых печей. Рассмотрим основные направления, позволяющие повысить эффективность.

Установка дополнительных охлаждающих блоков в шлаковом поясе с целью снижения износа огнеупоров. Для уменьшения износа огнеупоров, связанного с перегревом огнеупорных материалов в наиболее теплонапряженных зонах печи, необходимо снизить температуру их поверхности. Часто для этих целей предлагается установка холодильников в наиболее подверженных износу зонах.

В работе [3] рассмотрены экономические аспекты использования водоохлаждаемых медных блоков в футеровке печи. Типичные значения средней плотности теплового потока в огнеупорной футеровке ЭДП составляют около 5 кВт/м^2 . За счет охлаждения при использовании медных блоков тепловой поток увеличивается до значений около 30 кВт/м^2 .

По оценкам удельные потери энергии при использовании медных блоков охлаждения увеличиваются на величину примерно $5 \text{ кВт}\cdot\text{ч/т}$ жидкой стали. Предполагая, что стоимость электрической энергии $0,065 \text{ EUR/кВт}\cdot\text{ч}$, дополнительные затраты энергии, связанные с использованием медных блоков охлаждения на всей линии шлака, были оценены в $0,32\text{--}0,61 \text{ EUR/т}$ жидкой стали. Кроме того увеличиваются затраты на огнеупорные массы и на замену медных блоков (8 шт. в год), при этом снижается расход огнеупоров и увеличивается годовая производительность печи [3]. Таким образом, исследования показали, что указанные недостатки в денежном эквиваленте перекрывают преимущества, что не позволяет использовать это мероприятие для электродуговых печей и требует дополнительного анализа применительно к конкретным условиям работы печи.

Использование дополнительной теплоизоляции между огнеупорными материалами и корпусом подины. Использование высококачественных углеродистых изделий в стенах печи и области шлакового пояса имеет следующие преимущества:

- уменьшение деформации корпуса, а, следовательно, снижение риска аварийных ситуаций;
- увеличение производительности печи по причине более длительного срока службы корпуса;
- снижение затрат энергии.

Коэффициент теплопроводности периклазоуглеродистых огнеупоров значительно выше, чем у периклазовых и может превышать 16 Вт/(м·К) при низких температурах. Это положительно сказывается на способности огнеупоров отводить теплоту внутрь слоя при интенсивном нагреве поверхности, но отрицательно сказывается на тепловых потерях через кладку.

В работе [4] рассмотрены особенности использования дополнительной теплоизоляции в подине ЭДП и преимущества использования футеровки ISOMAG®70.

Введение в качестве дополнительной теплоизоляции слоя ISOMAG®70 толщиной 12,7 мм с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 0,29$ Вт/(м·К) позволило уменьшить среднюю температуру корпуса на 70 °С и сократить тем самым потери теплоты и деформацию корпуса, при сохранении расхода огнеупоров на прежнем уровне. Потенциальная годовая экономия составляет более 200 тыс. долл.

Автоматизация процесса торкретирования футеровки. Применение процесса торкретирования в качестве горячего ремонта футеровки сталеплавильных агрегатов с целью снижения себестоимости стали является одним из приоритетных направлений совершенствования технологии сталеплавильной плавки. Автоматизация горячего торкрет-ремонта нацелена на достижение высоких результатов работы технологии торкретирования: позволяет достичь экономии магнизиальной торкрет- и заправочной масс, увеличить полезное время работы сталеплавильного агрегата, улучшить экологические показатели производства, сделать труд технолога-сталеплавильщика безопасным.

За последнее время исследования в области процесса торкретирования выполнены российскими компаниями ЗАО «НПП им. М.И. Платова», ЗАО МО «Прогресс» и иностранными компаниями «RHI AG» (Австрия), «PiroMET A.S.» (Турция), «Minteq» (США) и др. Их научные разработки направлены на организацию холодных и горячих ремонтов с помощью процессов торкретирования и шоткретирования металлургических агрегатов [5].

Автоматизация процесса торкретирования футеровки электросталеплавильной печи с помощью роботизированного торкрет-манипулятора обеспечивает надежность работы и высокую стойкость кирпичной кладки ДСП, снижение общего времени на ее го-

рячие ремонты, уменьшение удельного расхода масс на тонну стали и безопасную работу технологов-сталеваров. Апробация результатов выполнена в Российской Федерации и на Украине в различном техническом исполнении роботов-манипуляторов (с частичной комплектацией) в ЭСПЦ ОАО «ОЭМК» (г. Старый Оскол, пуск в 2006 г.), ОАО «Северский трубный завод» (г. Полевской, пуск в 2008 г.), ООО «Электросталь» (г. Курахово, пуск 2010 г.), ОАО «ОМК-Сталь» (г. Выкса, пуск в 2011 г.), ОАО «НТМК» (г. Нижний Тагил, пуск в 2013 г.) [6].

Другой известной системой, зарекомендовавшей себя на практике, является роботизированная система MINSCAN™ с интерфейсом SCANTROL™ [7]. Полностью автоматизированная система технического обслуживания ЭДП была введена в январе 2003 г. Ниже приведены результаты, полученные после установки системы:

- время технического обслуживания огнеупоров ванны уменьшилось с 3,81 до 3,10 или на 0,71 мин/плавку, или 18,6 %;
- с использованием новой стратегии по регулированию состава шлака был удвоен рабочий период печи между заменами огнеупоров, что позволило снизить потребления кирпича с 3,37 до 1,86 или на 1,51 кг/т жидкой стали или 44,8 %;
- потребление торкрет-материала после введения автоматизированной системы увеличилось с 3,14 кг/т жидкой стали до 3,45 (на 0,31 кг/т жидкой стали или 9,9 %);
- потребление материалов на холодный ремонт уменьшается с 1,68 до 1,01 или на 0,67 кг/т жидкой стали или 39,9 %;
- количество материала для горячего ремонта снизилось с 2,79 до 1,86 на 0,93 кг/т жидкой стали или 33,3 %;
- получены конкретные нетто-сбережения в 1,39 евро/т жидкой стали. В результате общая чистая экономия составила более 320 тыс. евро/год.

Совершенствование методик оценки и инструментального измерения износа огнеупорной кладки. Перегрев подины и соответственно износ можно косвенно контролировать, используя показания термопар. Для этого необходимо следить за температурой, определяемой термопарой, которая установлена на нижней стороне кожуха печи. В случае неожиданного скачка температуры выше 450 °С, который не связан с поломкой термопар, следует проверить и отремонтировать огнеупоры нижней части печи перед следующим

выпуском. Однако необходимо учитывать, что высокие температуры могут возникать из-за излучения, исходящего от жидкого металла в ковше, который располагается под печью при выпуске металла.

Мониторинг целостности огнеупорной футеровки имеет важное значение для обеспечения безопасности операторов и определения времени оставшейся кампании печи. Раннее обнаружение деградации огнеупорной футеровки необходимо для избегания резких сбросов печи и предотвращения незапланированных отключений.

Пример использования акустических и ультразвуковых АУ-Е методик для оценки огнеупорной футеровки печи приведен в работе [8]. В настоящее время технология АУ-Е используется на различных технологических агрегатах в цветной металлургии, стекольной, химической и металлургической промышленности.

За последнее десятилетие техника АУ-Е эволюционировала с точки зрения аппаратных средств, программного обеспечения и сбора сигналов и интерпретации. Была создана обширная база данных различных видов отказов, тенденций ухудшения состояния огнеупоров и свойств материала. Эта база является неотъемлемой частью АУ-Е, которая прогрессировала от методики неразрушающего контроля в направлении комплексного подхода для мониторинга состояния печи. Процесс анализа данных становится более эффективным по времени поступления, делая наиболее важные результаты доступными для операторов печи в реальном времени.

Другим крайне важным направлением является использование акустических методов для контроля уровня вспененного шлака, который покрывает дуги и защищает огнеупорные материалы выше шлакового пояса от интенсивного излучения дуг. Кроме того для контроля покрытия дуг шлаком могут использоваться оптические методы, основанные на соотношении интенсивности ультрафиолетового и инфракрасного излучения.

Заключение. Проведенный анализ условий работы подины ДСП показывает, что для повышения эффективности ее использования наиболее целесообразно использование современных инструментальных и программных методов анализа износа футеровки с последующим автоматизированным ремонтом при помощи роботизированных систем. Кроме того возможно снижение тепловых потерь и получение других положительных эффектов при использовании

дополнительной теплоизоляции. В свою очередь дополнительное охлаждение горячих зон не всегда приводит к положительным экономическим результатам и требует дополнительных исследований.

Литература

1. **Кудрин, В.А.** Перспективы использования кислых сталеплавильных процессов / В.А. Кудрин // Сталь. – № 11. – 2001. – С.15–17.

2. **Лисиенко, В.Г.** Сооружение промышленных печей. Проектирование плавильных комплексов: Справочное издание. Кн. 2, т. I / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков, М.Г. Ладыгичев; под. ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2006. – 755 с.

3. **Economical** aspects of using water-cooled copper blocks in refractory linings / M. Kirschen [et. al.] // MPT International. – 2007. – № 6. – pp. 30–31.

4. **Taddeo, M.** Advantages by insulating an electric arc furnace with ISOMAG[®]70 / M. Taddeo, D. Spencer. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://pyrotek-inc.com/documents/techpapers/9-EAFTechnical%20PaperV1.pdf>. – Дата доступа: 05.09.2016.

5. **Корнилаев, С.М.** Шоткретирование и торкретирование футеровки сталеплавильных агрегатов / С.М. Корнилаев // Science and Education. – 2014. – Vol. 19. – С. 7–10.

6. **Корнилаев, С.М.** Автоматизация процесса торкретирования футеровки электросталеплавильной печи (ДСП) / С.М. Корнилаев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2015. – № 3. – С. 25–28.

7. **Gerling, R.** Automatic EAF refractory maintenance / R. Gerling, B. Stallmann, D. Blissenbach // MILLENNIUM STEEL. – 2005. – pp. 124–129.

8. **Monitoring** refractory lining in operating furnaces by acoustic ultrasonic-echo technique / A. Sadri [et. al.] // Proceedings of Conference of Metallurgists (2011, October), Montreal, Quebec, Canada. – 2011. – pp. 167–176.