

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

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ КОРПУСОВ

Введение. Водоохлаждаемый свод впервые был установлен в 1959 г. на ДСП-1,5 Красногорского завода цементного машиностроения (КЗЦМ), в 1968 г. на этой печи была проведена серия опытных плавки с водоохлаждаемыми сводом и стенами. В 1971 г. водоохлаждаемый свод был установлен на ДСП-10 ЭСПЦ того же завода. Вместе с тем, результаты показали, что экономическая эффективность внедрения водоохлаждаемого свода была сомнительной. Так, удельный расход электроэнергии при выплавке стали в ДСП-10 с кирпичным сводом составлял 680 кВт·ч/т, а с водоохлаждаемым – 746 кВт·ч/т. При этом разница этих величин в период плавления составляла 6 кВт·ч/т, в окислительный период плавки – 20 кВт·ч/т, в восстановительный – 40 кВт·ч/т [1]. Очевидно, что значительная доля потерь приходилась на окислительный и восстановительный периоды плавки. С увеличением производительности печи, а также сокращением окислительного и восстановительного периодов плавки уменьшается удельный расход электроэнергии.

В настоящее время современные высокоомощные электродуговые печи оснащаются водоохлаждаемыми корпусами и сводами. Это приводит к некоторому увеличению расхода электроэнергии, но вместе с тем существенно снижается расход огнеупоров, на 10–15 % уменьшается расход электродов, улучшается ремонтоспособность печей и в результате повышается их производительность [2].

Для исключения отрицательных описанных явлений и уменьшения тепловых потерь с охлаждающей водой применяют технологию ведения плавки с пенистым шлаком, который наводят, вдувая на границу раздела «металл–шлак» углеродсодержащий материал в струе кислорода таким образом, что дуга полностью экранируется от рабочего пространства печи.

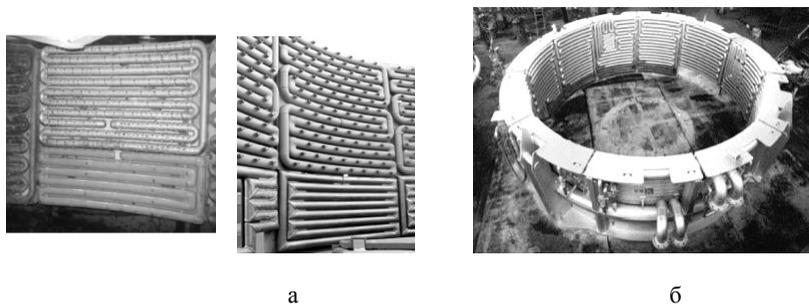
Расход электроэнергии при применении водоохлаждаемых стеновых панелей вместо огнеупорной футеровки увеличивается в среднем на 3 % (или на 15 кВт·ч/т) [3].

По данным [4], на ДСП-100 с удельной мощностью трансформатора около 300 кВА/т и производительностью до 200 тыс. т в год применение водоохлаждаемых панелей нецелесообразно. Для печей с удельной мощностью 800–1000 кВА/т и производительностью около 1 млн. т в год экономически целесообразна полная замена огнеупорной кладки корпуса и свода на водоохлаждаемые конструкции.

Конструкция водоохлаждаемых элементов. Большинство современных конструкций водоохлаждаемых корпусов и сводов состоит из опорных элементов с подводящими и отводящими коллекторами, к которым крепятся водоохлаждаемые панели, количество которых в среднем составляет 10–16 шт. для печей различных производителей.

Например, фирмой «Маннесман Демаг» (Германия) производились панели с различным диаметром и толщиной стальных труб, противостоящим тепловым потокам до 600 кВт/м². При больших тепловых потоках стальные панели рекомендуется заменять на медные [3].

Особенностью работы водоохлаждаемых панелей является их покрытие слоем шлака с вкраплениями металла. Данный слой гарнисажа участвует в теплопередаче и влияет на тепловые потери через корпус и свод печи.



а б
Рисунок 1 – Водоохлаждаемые панели (а) и водоохлаждаемый корпус электродуговой печи (б)

При увеличении толщины защитного слоя тепловые потери через корпус и свод уменьшаются, поэтому для удержания огнеупорного слоя поверхность панелей часто ошиповывают.

Моделирование тепловой работы водоохлаждаемых панелей. Система охлаждения корпуса печи работает в режиме вынужденной конвективной теплоотдачи. Тепловой поток определяется соотношением

$$Q = \alpha \Delta T F, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к воде, $\Delta T = T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}}$ – температурный напор, определяемый разностью температуры $T_{\text{ст}}$ теплоотдающей охлаждаемой поверхности площадью F и средней температурой охлаждающей жидкости $T_{\text{ж}}$.

Методика расчета температурного поля водоохлаждаемых панелей представлена в работе [2].

В качестве граничного условия на поверхностях панелей, обращенных к источнику излучения, задается тепловой поток излучением (конвективную составляющую теплового потока приняли равной нулю). На поверхностях труб, контактирующих с охлаждающей водой, задается коэффициент теплоотдачи, вычисляемый из критерияльного соотношения $\text{Nu}_{\text{ж}} = \frac{\alpha \cdot d_m}{\lambda_{\text{ж}}}$ в зависимости от скорости

движения воды в трубах и предварительно заданной температуры всех объектов. Так как коэффициент теплоотдачи несколько зависит от температуры охлаждаемой поверхности, то после определения температуры поверхности стенки трубы расчет повторяют с первого этапа.

В качестве основных размеров объектов, используемых при моделировании, использовали размеры, характерные для 100–120 т электродуговых печей.

В качестве объекта излучения задан цилиндрический объект с высотой 130 мм и температурой 5000 °С, расположенный на расстоянии 2,4 м от панели. Толщина стенки трубы 16 мм. Толщина слоя гарнисажа изменялась от нуля до 50 мм. Теплофизические характеристики материалов принимались как функция температуры. Скорость воды в трубе принята равной 1,85 м/с.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи от стенки труб к воде составило $7000 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

На рисунке 2 представлена зависимость температуры поверхности гарнисажа от его толщины, полученная по результатам расчета температурного поля участка стеновой панели в стационарном состоянии при различных толщинах слоя гарнисажа.

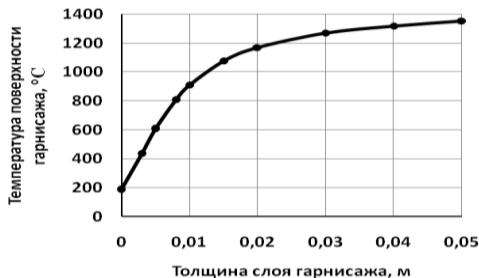


Рисунок 2 – Зависимость температуры поверхности гарнисажа от его толщины

Как следует из результатов расчетов, приведенных в виде графика на рисунке 2, наличие слоя гарнисажа приводит к возрастанию температуры внутренней поверхности корпуса, что улучшает условия теплообмена с ванной печи, температура поверхности которой составляет $1500\text{--}1650 \text{ °С}$. При этом полученная зависимость является нелинейной.

На рисунке 3 представлена зависимость тепловых потерь через панель от толщины слоя гарнисажа.

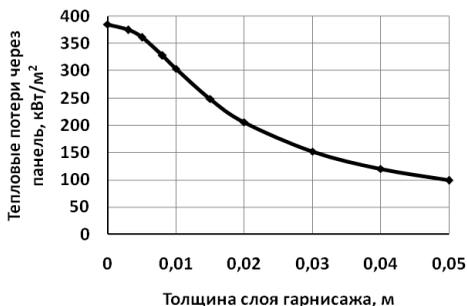


Рисунок 3 – Зависимость тепловых потерь через панель от толщины слоя гарнисажа

Как следует из рисунка 3, отсутствие слоя гарнисажа увеличивает тепловые потери через панели в 2–3,5 раза и свидетельствует о целесообразности исследования экономической эффективности применения искусственных огнеупорных покрытий на поверхности панелей.

Расчет нагрева и охлаждения панелей, покрытых слоем гарнисажа, также показал их малую инерционность, что не позволяет использовать теплоту, накопленную стенами в начальный период плавки в отличие от печей с кирпичной кладкой.

Полученные при моделировании значения удельных тепловых потоков можно использовать для уточнения температуры охлаждающей воды на выходе из системы или на выходе из отдельной панели, а также для вычисления повышения температуры воды при прохождении через систему.

Направления совершенствования конструкции и условий эксплуатации водоохлаждаемого корпуса электродуговых печей. Можно выделить несколько направлений, которые рассмотрены ниже.

Совершенствование конструкций традиционных водоохлаждаемых панелей. Шлак является эффективным изоляционным материалом, имеющим среднее значение коэффициента теплопроводности 5–1,2 Вт/(м·К) при коэффициенте теплопроводности стальных труб 50–35 Вт/(м·К). Таким образом, целесообразно удерживать слой шлака на панелях для их защиты. Тем не менее, держатели шлака не позволяют непрерывно поддерживать защитный слой шлака на поверхности панелей. Во-первых, в ходе плавки тепловые и механические удары могут привести к осыпанию затвердевшего слоя шлака, в нескольких местах. Во-вторых, в горячих точках в условиях высокой интенсивности излучения электрической дуги шлаковое покрытие быстро повторно плавится и стекает обратно в жидкую ванну. Обнаженные зоны с водяным охлаждением панели затем подвергаются значительной тепловой нагрузке, которая приводит к напряжениям и трещинам.

Авторами [5] проведены исследования эффективности различных типов удерживающих гарнисаж элементов, защищенных огнеупорным материалом на своде электродуговой печи вместо стандартных держателей. Промышленные испытания показали наилуч-

шие результаты для медных фиксаторов, однако в целом данное мероприятие признано неэффективным.

Наибольший положительный эффект показала практика приварки стандартных шипов-держателей к панелям для улучшения теплоотвода. Усовершенствованная практика для сварки шлаковых держателей значительно повысила срок службы свода (от 1200 плавок до более 2000 плавок), а также позволила снизить частоту промежуточных ремонтов.

Использование огнеупорного слоя для покрытия панелей. Покрытие свода слоем огнеупорной массы в целом также признано неэффективным, так как слой разрушается слишком быстро по сравнению со сроком службы панелей свода. Однако данная практика была реализована в промышленном масштабе на металлургическом заводе фирмы «PADI», так как оказалось, что она эффективно защищает свод во время начала плавок. Частота случаев уменьшения мощности из-за обнаруженного перегрева свода была снижена, в результате чего было достигнуто более короткое время под током [5].

Промышленные испытания покрытых огнеупорами водоохлаждаемых панелей в ЭДП, проведенные фирмой «Tenaris Dalmine» с двумя различными конфигурациями модифицированных панелей, привели к следующим результатам и выводам [5]:

1) в течение первых плавок использование огнеупорной футеровки на водоохлаждаемых панелях позволило снизить тепловые потери через стенку (в сравнении с обычной панелью снижение составило около 60 % для первой модифицированной конфигурации панели и 25 % для второй);

2) после первоначального износа покрытия панелей покрытие все равно сохраняется и в результате тепловые потери «частично изношенной панели + нарастающего и оплавливающегося слоя шлака» уменьшены на 40 % по сравнению с обычными водоохлаждаемыми панелями.

Показано, что тепловые потери можно снизить примерно на 65 кВт·ч/плавку (т.е. на 40 % по сравнению со средним значением 150 кВт·ч/плавку для традиционных панелей) в течение приблизительно 2-х недель для одной панели. Такое сокращение, экстраполированное на 15 боковых панелей печи, соответствует 975 кВт·ч за плавку или 9,3 кВт·ч/т стали (снижение потребления электроэнергии на 2,5 %). Это сокращение приводит к экономии

$975 \text{ кВт}\cdot\text{ч/плавку} \times 390 \text{ плавков} \times 0,06 \text{ EUR/кВт}\cdot\text{ч} = 22\,815 \text{ EUR}$ за 2 недели работы (2 недели – это период между последовательными 10-часовыми «холодными» остановками печи по техническому обслуживанию) [5]. Чтобы обеспечить автономную реконструкцию огнеупорной футеровки панелей, должен быть приобретен комплект запасного корпуса печи (15 панелей) (стоимость: около 30 тыс. EUR) и корпус должен полностью заменяться каждые две недели в течение смены технического обслуживания. Предполагаемые затраты на замену, чистку панелей, сварку новых огнеупорных анкеров, литье новой огнеупорной футеровки (оценочная стоимость – 3 тыс. EUR) и сушку панелей в общей сложности составляет 20 тыс. EUR [5]. На основе данных расчетов срок окупаемости футеровки панелей составляет около одного года. Тем не менее, не были полностью оценены некоторые дополнительные преимущества и недостатки. Из-за снижения потребляемой электроэнергии можно ожидать увеличения производительности печи. С другой стороны будет образовываться больше отходов огнеупоров, а нагрузка работников во время смены техобслуживания будет значительно увеличена.

Использование новых конструкций водоохлаждаемых панелей. Фирмой «РОУД» были внедрены трубчатые водоохлаждаемые элементы более чем на десятке предприятий стран СНГ. При этом имеется опыт работы панелей как на крупных печах (100 т), так и на печах малой емкости (10 и 6 т). Для водоохлаждаемых элементов стен и свода достигнута стойкость на уровне 20–30 тыс. ч. В основе новых разработок использованы принципы неплотной укладки труб и их пространственного расположения [6].

При конструировании панелей используется математическое моделирование, что в результате позволяет снизить как тепловые потери, так и термомеханические напряжения [3].

В настоящее время многие производители предлагают конструкции двухслойных водоохлаждаемых панелей с независимыми контурами охлаждения. Пример водоохлаждаемых панелей с дополнительным фронтальным змеевиком представлен на рисунке 4.

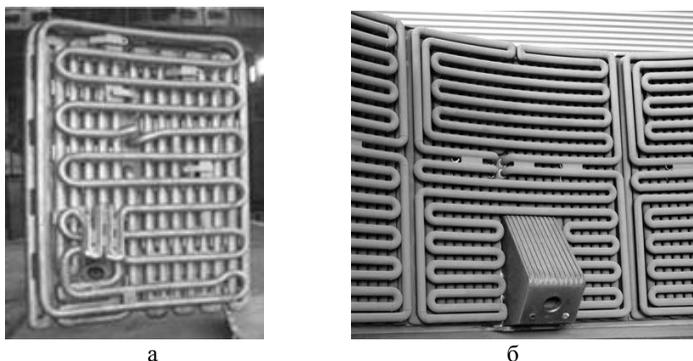


Рисунок 4 – Трубчатая водоохлаждаемая панель с фронтальным змеевиком фирмы «РОУД» (а) и «Danieli» (б)

Преимуществами двухслойных панелей является возможность закрепления слоя гарнисажа большей толщины, чем при использовании стандартных панелей, а также меньшие термические напряжения вследствие гибкости фронтальной части. Кроме того, в случае прогара фронтального водоохлаждаемого элемента его можно отключить, а внешнюю часть панели продолжать эксплуатировать некоторое время до замены.

По информации фирмы «Danieli» в отличие от стандартных панелей с максимальными температурами поверхности шлака $640\text{ }^{\circ}\text{C}$ и максимальным тепловым потоком 563 кВт/м^2 , отводимым водой, максимальная температура поверхности шлака энергосберегающих двухслойных панелей производства «Danieli» составляет более $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а максимальный тепловой поток, отводимый водой, – 452 кВт/м^2 . В результате достигнут показатель стойкости панелей на производстве в 20 тыс. плавков.

Единственным способом снижения температуры рабочей поверхности огнеупоров является их принудительное охлаждение. Этой проблеме были посвящены некоторые работы, выполненные Московским вечерним металлургическим институтом (МВМИ) совместно с различными металлургическими и машиностроительными заводами. Анализ причин низкой эффективности замены огнеупорной кладки на водоохлаждаемые панели позволил специалистам МВМИ сделать заключение, что эффективность применения

охлаждаемых элементов возрастает как с ростом емкости, так и с увеличением производительности печи [4].

Для малотоннажных печей средней производительности возможно использование огнеупорной кладки с установкой разреженных панелей, позволяющих снизить разрушение поверхности огнеупоров. Например, фирмой «РОУД» предлагаются разреженные панели для малотоннажных электродуговых печей с огнеупорной кладкой [6].

Управление шлаковым режимом. Снижение интенсивности излучения на протяжении жидкого периода плавки обеспечивается управляемым вспениванием шлака. Для наиболее эффективного режима вспенивания используют регулирование состава шлака, содержания углерода и кислорода, а также контроль покрытия шлаком дуг. Современные методы контроля основаны на использовании оптических и акустических датчиков и автоматической системы управления.

Заключение. Гарнисаж играет значительную роль в тепловой работе водоохлаждаемых элементов, снижая температуру стенки труб и увеличивая температуру внутренней поверхности стен и свода печи, что благоприятно сказывается на теплообмене. Влияние толщины слоя гарнисажа на тепловые потери и температуру поверхности панелей описывается нелинейной функцией.

Анализ направлений совершенствования конструкций панелей показал, что следует обратить внимание на улучшение качества сварки держателей гарнисажа в местах контакта с трубами панели, на покрытие панелей огнеупорным материалом, а также использованию новых двухслойных панелей для печей различной емкости.

Литература

1. Сосонкин, О.М. Энерготехнологические особенности плавки стали в дуговой сталеплавильной печи и перевод ДСП на работу с водоохлаждаемым сводом конструкции МГВМИ / О.М. Сосонкин, М.В. Шишимиров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 62–69.

2. Корнеев, С.В. Особенности тепловой работы водоохлаждаемых панелей в электродуговых печах / С.В. Корнеев, И.А. Трусова // Ли-

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