СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ РАЗГАРА ОГНЕУПОРНОЙ ФУТЕРОВКИ ГОРНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ*

А. Н. ДМИТРИЕВ¹, д-р техн. наук, действительный член РАЕН, действительный член Академии инженерных наук РФ, главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов, andrey.dmitriev@mail.ru;

М. О. ЗОЛОТЫХ¹, канд. техн. наук, ведущий инженер лаборатории пирометаллургии черных металлов;

К. ЧЭНЬ², главный представитель по Российской Федерации, skkont@163.com;

Г. Ю. ВИТЬКИНА¹, канд. техн. наук, научный сотрудник лаборатории пирометаллургии черных металлов

(¹ Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, Россия, г. Екатеринбург;

² Металлургический проектный институт провинции Шаньдун, Китай, г. Цзинань)

Аннотация. Для безопасной и эффективной эксплуатации доменной печи важно в любой момент времени знать остаточную толщину огнеупорной футеровки горна доменной печи, прежде всего расположение наиболее поврежденных областей. Использование традиционных способов контроля футеровки горна и лещади часто приводит к ошибочной диагностике.

Институтом металлургии Уральского отделения Российской академии наук разработана математическая модель, обеспечивающая трехмерную оценку состояния кладки и оптимизацию вычислений для работы в режиме реального времени.

Расчет ведется путем решения уравнений теплопроводности с использованием показаний большого числа датчиков температуры (до 700), вмонтированных в футеровку печи между огнеупорными блоками. Алгоритм расчета усовершенствован для учета сложного профиля нижней части доменной печи с использованием теоремы отсчетов. Используется система сбора, обработки и передачи информации от датчиков температур в базу данных программы. Непрерывный контроль изменения температуры в каждой точке позволяет определить текущую толщину огнеупорной футеровки и предупредить персонал печи о начале разгара футеровки. Разработанный интерфейс программы позволяет мастеру печи использовать многие дополнительные функции контроля, в частности оставшейся толщины футеровки, в том числе: прямую визуализацию состояния и тенденции изменения разгара, распределение температур в любой точке футеровки на компьютерном мониторе, сигнализацию об опасной зоне; объемное температурное распределение (изотермы) и тенденции их изменений. Язык интерфейса: китайский, английский, русский.

Ключевые слова: доменная печь; огнеупорная футеровка; диагностика; термпары; математическая модель.

Ссылка для цитирования. Дмитриев А.Н., Золотых М.О., Чэнь К., Витькина Г.Ю. Сравнительный технологический анализ систем контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. 2018. № 8. С. 82–91.

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-82-91

Состояние вопроса

Для безопасной и эффективной эксплуатации доменной печи важно в любой момент времени знать остаточную толщину огнеупорной футеровки горна доменной печи, прежде всего расположение наиболее поврежденных областей. Предпринимаемые попытки регламентировать длительность кампании на основе статистических данных не могут полностью обеспечить требуемую надежность эксплуатации конструкции печи, поскольку разрушение футеровки даже в печах равного объема, работающих практически

в одинаковых условиях, происходит по-разному [1]. Для решения этой задачи применяются разнообразные системы диагностики состояния кладки доменной печи.

Единого подхода к организации систем диагностики не существует. Основная трудность при контроле износа футеровки состоит в том, что невозможно непосредственно измерить остаточную толщину стенок. Ее можно определить только косвенными методами [2].

* Работа выполнена в рамках государственного задания Имет УрО РАН по теме № 0396-2015-0081.

Системы диагностики огнеупорной кладки

На сегодняшний день существующие системы диагностики огнеупорной кладки предполагают использовать специальные зонды, радиоактив-

ные изотопы, звуковые волны, измерение теплофизических характеристик печи.

Использование специальных зондов

Специальные зонды в зависимости от конструкции и принципа действия могут быть размещены в кладке как при реконструкции печи, так и на любой стадии эксплуатации. Например, существуют технологии отбора керн (бурение до температур 600 °С), такой способ применим только на остановленных доменных печах и сопряжен с серьезным риском повреждения кладки [3].

Также возможно размещение различных зондов, щупов и датчиков, находящихся в непосред-

ственном контакте с огнеупором, в процессе строительства или реконструкции печи. Примером системы контроля на основе зондов является разработка Днепропетровского металлургического института, сейчас — Национальная металлургическая академия Украины (НМетАУ) [4].

Полученная при помощи зондов информация относится лишь к месту установки датчика, что требует для представительного контроля значительного числа подобных устройств [5].

Использование радиоактивных изотопов

Систем контроля футеровки, основанных на использовании радиоактивных изотопов, немного, но они существуют. Примером могут служить доменные печи завода Solmer, Франция. Система была применена на доменных печах объемом 2490 м³. В кладке были размещены изотопы кобальт-60 (⁶⁰Co) по четыре группы на семи горизонтах с одинаковым расстоянием по окружности. В каждой из 28 точек было заложено по три источника излучения на равном расстоянии от поверхности футеровки. Интенсивность

излучения измеряли при помощи переносного детектора до задувки и в процессе кампании печи. Потери источников излучения соответствовали износу футеровки в данной зоне [6].

Естественные потери радиоактивности в течение кампании доменной печи будут весьма существенными. Кроме того, описанная методика не может быть использована для измерений в режиме реального времени и позволяет производить оценку кладки только в непосредственной близости от заложенных изотопов.

Использование звуковых волн

Существует несколько способов решения данной задачи, при этом методики диагностики состояния горна при помощи звуковых волн разделяются на “активные” и “пассивные”. В “активных” методах используется внешнее возбуждение упругих колебаний в футеровке, а в “пассивных” такое возбуждение отсутствует. Примером “пассивного” метода диагностики является разработка ООО “Диагностика металлургических агрегатов и технология” [3].

Диагностика печи происходит за счет анализа зарегистрированных сигналов акустической эмиссии, образующихся в футеровке во время работы доменной печи. Сигналы акустической эмиссии представляют собой акустические волны, которые возникают в футеровке из-за нарушения ее сплошности, подвижек шихтовых материалов. Они распространяются по футеровке и их можно зарегистрировать на кожухе доменной печи. В спектральном составе этих акустических сигналов содержатся резонансные частоты футеровки, по которым можно рассчитать толщину ее слоев. Данная система является технически сложной и используется для разовой оценки состояния печи, в качестве постоянно действующей

системы оценки состояния в режиме реального времени не применяется.

К “активным” методам диагностики состояния металлоприемника доменной печи относится разработка ООО “Техноконсалтинг”. Эта разработка представляет собой запатентованный комплекс ультразвукового контроля состояния горна, лещади и шахты доменных печей [7]. Наибольшую трудность в применении “активных” акустических методов для контроля состояния футеровки представляет стальной кожух доменной печи. Он имеет большую плотность и почти на порядок меньшее акустическое сопротивление, чем футеровка. Энергия упругих колебаний, возбужденных в кожухе, на много порядков больше, чем проникающая в футеровку. Выделить из них упругие колебания футеровки, а из спектра резонансные частоты кладки задача трудная, но решаемая [3].

Как “активные”, так и “пассивные” системы диагностики состояния кладки на основе звуковых волн способны достаточно четко отражать состояние футеровки горна доменной печи. Однако такие системы являются технически сложными, что определяет их высокую стоимость и серьезные квалификационные требования к об-

служивающему персоналу. Поэтому такие системы используются как средство периодической диагностики. Основным достоинством методов звуковой диагностики является возможность об-

следования горна печи без необходимости установки специальных датчиков внутрь кладки на этапе строительства.

Измерение теплофизических характеристик печи

Наибольшее распространение среди систем диагностики состояния кладки получили системы, основанные на измерении теплофизических характеристик печи. В основе таких систем лежит решение дифференциального уравнения теплопроводности Фурье [8].

Существующие модели оценки состояния кладки горна, основанные на теплофизических характеристиках печи, различаются по способам решения обратной задачи теплопроводности и по источнику данных о тепловом потоке и температуре стенок. Обратная задача теплопроводности подразумевает нахождение толщины огнеупорной стенки по известным характеристикам огнеупоров (плотность, теплоемкость и теплопроводность) и тепловому потоку через стенку или распределению температур внутри стенки. Алгоритм определения состояния кладки может базироваться на одно-, двух- и трехмерной модели теплового потока и распределения температур. Численное решение дифференциального уравнения может производиться как в реальном времени, так и перебором приготовленных заранее решений (шаблонов разгара). Использование предварительных вычислений предназначено для ускорения получения информации о разгаре.

Для решения дифференциального уравнения теплопроводности применительно к горну доменной печи необходимо знать температуру внутренней поверхности кладки (или слоя гарнисажа). Искомая температура является температурой эвтектики материалов плавки и может быть определена из диаграммы железо–углерод. Из диаграммы следует, что в общем случае температурой эвтектики в доменной печи можно считать величину 1150 °С.

При решении дифференциального уравнения объектом поиска может быть как температурное поле, так и тепловой поток через стенки печи. При помощи теплового потока очень удобно вести оценку состояния кладки, так как рост теплового потока через стенку печи пропорционален ее остаточной толщине. Размытие кладки приводит к увеличению теплового потока. На примере печи Shougang, Китай, тепловой поток через стенку менялся следующим образом: 2066 Вт/м² — исходный профиль, 12773 Вт/м² — после растворения керамического стакана, 15849 Вт/м² — при остаточной толщине стенки 1000 мм и 25883 Вт/м² — при толщине стенки 600 мм. Аналогично уменьшение теплового потока свидетельствует об образовании гарнисажа [9].

Существующие системы диагностики состояния кладки, основанные на измерении теплофизических характеристик горна

Для получения данных, необходимых для численного решения дифференциального уравнения теплопроводности, могут быть использованы различные источники: специальные датчики теплового потока; датчики температуры и расхода теплоносителя в холодильниках; датчики температуры, установленные внутри кладки горна.

Система, основанная на измерении теплового потока, применяется на печах комбината Stahlwerke Bremen, Германия [2]. Датчик теплового потока представляет собой диск диаметром 49 мм и толщиной 10 мм, изготовленный из нитрида кремния на химической связке (RBSN). Диск располагается в кладке печи перпендикулярно измеряемому тепловому потоку. Разность температур измеряется термопарами.

Еще один вариант датчика теплового потока предложен группой специалистов Уральского федерального университета [10]. Основу методики составляет использование специальных датчиков теплового потока. Разработанный датчик теп-

лового потока представляет собой цилиндр с муллитокорундовым наполнителем МКН-94. Длина цилиндра — 1600 мм, диаметр — 300 мм, он устанавливается параллельно направлению измеряемого потока в стенке печи. Особенностью методики является усреднение показаний датчиков с периодом, равным длительности цикла “накопление–выпуск”, это позволяет исключить из расчетов краткосрочные изменения теплового потока, связанные с потерями тепловой энергии при выпуске нагретых продуктов плавки [10].

При описании методики оценки состояния кладки на основе датчиков теплового потока следует отметить, что универсальной конструкции такого датчика не существует. Поэтому все такие датчики являются мелкосерийными, что, в свою очередь, определяет сложность их изготовления и калибровки.

Еще одним способом определения теплового потока через стенки печи является использова-

ние информации (расход теплоносителя и его температура) от горновых холодильников. Системы охлаждения, помимо своего прямого назначения, являются источником информации о тепловом состоянии печи, идущих в ней процессах, в том числе и о состоянии огнеупорной кладки. Эта информация содержится в величинах теплосъема с охлаждаемых деталей, причем замеры собственно теплосъема организуются в том числе и как необходимый момент в эксплуатации систем охлаждения, контроля их функционирования.

В НИПИ “Энергосталь” разработан комплексный метод контроля состояния кладки горна и лещади по тепловым потокам на элементы системы периферийного и подлещадного охлаждения [5]. В основе метода диагностики разгара огнеупорной кладки также лежит решение обратной задачи теплопроводности. Метод заключается в том, что для заданной конструкции печи на ЭВМ заблаговременно рассчитывается несколько сотен характерных вариантов разгара кладки, которым соответствуют определенные расчетные значения теплосъема. По фактически измеренным значениям подбирается наиболее близкий профиль разгара. После каждого изменения профиля печи вводятся поправки в теплофизические свойства материалов вблизи разгара [5].

В последние годы наибольшее развитие получили способы контроля толщины футеровки доменных печей с помощью термодатчиков, установленных в кладке, вследствие их относительной простоты, надежности и безопасности измерения температур [10]. В таких системах тепловой поток определяется по разнице температур соседних датчиков и по известным заранее теплопроводностям огнеупоров между ними.

Одной из систем контроля состояния кладки на основе показаний термодатчиков является система “Футеровка”, разработанная под руководством В.Г. Макиенко (Украина) [11].

Основу системы составляют термодатчики, расположенные в кладке металлоприемника и лещади печи. В качестве датчиков используются термопары специальной конструкции, рассчитанные на работу при температурах до 1700 °С. На доменных печах Китая с 2004 по 2009 г. число датчиков, установленных на семи доменных печах полезным объемом 2500–4500 м³, оборудованных рассматриваемой системой, варьирова-

лось от 400 до 700. Номинальное число термопреобразователей и места установки их как по окружности (сечениям), так и по высоте (поясам) горна определяются для каждой печи индивидуально, исходя из ее геометрических размеров и конструктивных особенностей. Расчет остаточной толщины кладки футеровки производится локально по одно- и двумерным моделям.

На основе многомерной теории теплопередачи введены основные принципы трехмерного анализа эрозии футеровки горна доменной печи. Кроме того, принципы вычисления двумерных профилей эрозии в вертикальном и горизонтальном сечениях даны с практической точки зрения. Обсуждены несколько технических проблем числовой модели эрозии. Примеры показывают, что предложенная вычислительная методология эрозии футеровки надежна и может обеспечить техническую поддержку для безопасной работы горна доменной печи [12].

Существуют системы диагностики кладки, сочетающие несколько способов получения информации о тепловом потоке. Например, технологии, совмещающие измерения температуры охлаждающей воды и размещение датчиков в кладке печи. К подобным системам можно отнести разработку Института черной металлургии НАН Украины под руководством Н.М. Можаренко [13]. Система базируется на уравнении теплопроводности для плоской многослойной стенки. Тепловой поток при этом считается одномерным. Расчеты производятся либо по показаниям термопар внутри футеровки, либо по показаниям термопар на входе и выходе воды из холодильника и данным о ее расходе.

Данные систем диагностики, основанные на температурных характеристиках, могут быть использованы не только для отображения текущего состояния кладки горна доменной печи, но и для прогнозирования его изменения. Система прогнозирования может использоваться отдельно от системы мониторинга, но при этом применять накопленные ее данные. В качестве примера можно рассмотреть разработку [14]. Основу методики составляет применение вейвлет-анализа для обнаружения закономерностей в разгаре футеровки. Решение рассматриваемой задачи основано на экстраполяционном подходе. В рассматриваемом алгоритме для экстраполяционного продолжения исследуемого временного ряда используются заранее подобранные типовые функции.

Продление кампании доменной печи на основе результатов диагностики

Современные системы диагностики состояния горна доменной печи позволяют следить за изменением рабочего профиля для своевременного принятия мер по наращиванию или размыву гарнисажа и воздействия на зону малоподвижных материалов с целью ее уменьшения. Если осуществлять постоянный контроль за состоя-

нием гарнисажа и принимать меры по его наращиванию, то можно продлить срок службы огнеупоров горна и лещади на неограниченное время [7]. Гарнисаж является своего рода защитой от теплового разгара и эрозионного разрушения. Поэтому определение и поддержание рациональной толщины гарнисажа горна явля-

ется весьма важным с позиции защиты футеровки и увеличения длительности кампании печи [13].

Например, в Китае (State Key Laboratory of Advanced Metallurgy and School of Metallurgical and Ecological Engineering of University of Science and Technology Beijing) доктор Hong-bo Zhao с сотрудниками [9] в течение более чем десяти лет ведет работы по разработке способов раннего обнаружения разгара горна на основе температур охлаждающей воды холодильников.

Защитный гарнисаж обычно формируется путем использования специальных добавок в шихту. В работе [15] описан ряд таких добавок.

Из приведенного выше обзора способов диагностики состояния кладки футеровки горна доменной печи следует, что развитие таких систем направлено не только на предотвращение аварий, но и на продление кампании доменной печи в условиях нормальной эксплуатации. Для решения этой задачи помимо обнаружения дефектов кладки необходимо оценивать состояние гарнисажа в печи, образование которого при определенных параметрах процесса является одним из лучших способов защиты футеровки от износа.

Наиболее перспективными способами диагностики состояния кладки являются способы, осно-

ванные на измерении температурных характеристик металлургического агрегата. Основным их достоинством является возможность организации мониторинга кладки в реальном времени, без использования дорогостоящего и сложного оборудования и без нарушения прочности самой кладки. Кроме того, ввиду непрерывности процесса диагностики температурные способы хорошо подходят для информационного обеспечения процесса наращивания и поддержания защитного гарнисажа.

Выше было рассмотрено несколько моделей оценки состояния кладки. Наиболее релевантной рассматриваемой задаче, по мнению авторов, является методика контроля разгара, разработанная под руководством В.Г. Макиенко, однако и она не является идеальной и оставляет возможность для совершенствования. Основными проблемами модели являются: большое количество вычислительных операций (низкая скорость обработки информации), необходимость предварительного лабораторного анализа материалов кладки и расположение датчиков внутри агрегата, нерелевантное некоторым профилям разрушения стенок горна.

Традиционный способ контроля футеровки горна и лещади на основе показаний термопар

Закладка термопар по различным поясам и сечениям футеровки печи без использования математической модели дает только информацию по точкам температур замера. Традиционный способ контроля футеровки горна и лещади имеет следующие недостатки:

- хотя информации по температуре достаточно много, даже опытному специалисту трудно быстро проанализировать, что произошло внутри

футеровки печи, а также часто происходит ошибочная диагностика;

- нет визуализации, нет предупреждения (сигнализации) об опасной зоне футеровки;

- нет рекомендаций по устранению существующей опасности;

- нет рекомендаций по текущему определению производственных технологических параметров доменной печи о предотвращении прорыва горна.

Разработка оптимальной системы диагностики

Способы, основанные на использовании специальных зондов и радиоактивных изотопов, обладают высокой степенью достоверности, но требуют очень затратной инженерной подготовки на этапе строительства футеровки и, как правило, обеспечивают диагностику только в очень небольших, локальных зонах кладки. Поэтому

далее рассмотрим комбинацию методов диагностики, опирающихся на показания термопар, тепловой поток через систему охлаждения и акустические данные. Именно эти методики по отдельности получили наибольшее практическое распространение.

Система контроля состояния футеровки горна, разработанная в Институте металлургии УрО РАН

В 1997 г. компания АО «Металлургический проектный институт провинции Шаньдун» (SDM, г. Цзинань, Китай) совместно с Северо-Восточным университетом (г. Шэньян, Китай) начала разработку современной системы с использованием двумерной математической модели для

контроля футеровки горна и лещади доменной печи.

В 2000–2013 гг. компания SDM успешно разработала и внедрила систему визуализации, диагностики, контроля и сигнализации футеровки доменной печи с использованием математической модели 2D–3D на ряде доменных печей Китая.

В 2007 и 2008 г. на двух доменных печах в Китае компания SDM совместно с другими китайскими разработчиками выполнила проверку соответствия результатов расчета по математической модели с фактическими данными геометрических замеров остатков футеровки горна и лещади печи при капитальном ремонте. Результаты проверки дали положительные результаты (рис. 1).

В 2010–2015 г. компания SDM совместно с Институтом металлургии УрО РАН (г. Екатеринбург) внедрила новую систему контроля с использованием трехмерных математических моделей на пяти доменных печах объемом от 1080 до 3200 м³ в Китае: Jinan Iron & Steel Company в г. Цзинань ДП № 4 объемом 3200 м³ (683 термопары), Henan Jiyuan Iron & Steel (Group) Company в г. Цзиюань ДП № 2 объемом 1080 м³ (212 термопар), Guangxi Liuzhou Iron & Steel (Group) Company в г. Лючжоу ДП № 4 объемом 2500 м³ (524 термопары), Jinan Iron & Steel Company в г. Цзинань ДП № 3 объемом 1750 м³ (524 термопары),

Jinan Iron & Steel Company в г. Цзинань ДП № 1 объемом 1750 м³ (524 термопары).

Рис. 1. Обследование и проверка соответствия математической модели разгара футеровки

Fig. 1. Survey and check of correspondence of lining deterioration mathematical model

Преимущества новой системы [16]

Расчет ведется путем решения уравнений теплопроводности с использованием показаний большого числа датчиков температуры (до 700), вмонтированных в футеровку печи между огнеупорными блоками. Алгоритм расчета усовершенствован в части учета сложного профиля нижней части доменной печи с использованием теоремы отсчетов. Используется система сбора, обработки и передачи информации от датчиков температур в базу данных программы. Непрерывный контроль изменения температуры в каждой точке позволяет определить текущую толщину огнеупорной футеровки или появление гарнисажа и предупредить персонал печи о начале разгара футеровки. Разработанный интерфейс программы позволяет мастеру печи использовать многие дополнительные функции контроля, в частности историю показаний датчиков, оставшейся толщины футеровки, в том числе прямую визуализацию состояния, тенденцию изменения разгара, оставшейся толщины огнеупорной стенки, распределение температур по любой точке в футеровке на компьютерном мониторе, сигнализацию об опасной зоне, предотвращение прорыва горна, объемное температурное распределение (изотермы) и тенденцию их изменений. Язык интерфейса: китайский, английский, русский. На рис. 2–5 показаны примеры интерфейса программы.

Рис. 2. Схема расположения термпар (вертикальное сечение)

Fig. 2. Diagram of thermocouples location (vertical section)

Рис. 3. Температурное поле в футеровке горна (вертикальное сечение)

Fig. 3. Temperature field in the hearth lining (vertical section)

Рис. 4. Температурное поле в футеровке горна (горизонтальное сечение)

Fig. 4. Temperature field in the hearth lining (horizontal section)

Рис. 5. График изменения во времени температур в некоторых точках расположения термопар в одном из горизонтальных сечений

Fig. 5. Graf of temperature variation in time in some points of thermocouples location in one of horizontal section

Основные научные достижения в данной разработке

1. Разработана математическая модель тепловых процессов в кладке горна доменной печи, которая позволяет на основе данных о температурах в фиксированных точках кладки определять температурное поле по высоте и радиусу огнеупорной футеровки и на основе полученной информации определять профиль горна печи. Алгоритм расчета усовершенствован в части учета сложного профиля нижней части доменной печи с использованием теоремы отсчетов (теорема Котельникова или теорема Найквиста–Шеннона).

2. Разработана методика оптимальной установки термопар (число и координаты) в огнеупорной футеровке горна, адаптированная к разработанной математической модели, учитывающая возможность выхода из строя датчиков и

необходимость повышенного внимания к зонам огнеупоров, наиболее подверженным эрозии [17].

3. Разработана методика расчета эффективной теплопроводности — величины, позволяющей осуществлять адаптацию разработанной модели к объекту диагностики за счет компенсации систематических погрешностей при расчетах. Данная методика основана на математической обработке кривых разгона температур после задувки доменной печи (см. рис. 5) [18].

4. Определены технологические требования к исходным данным, получаемым от температурных датчиков и используемым при построении температурного поля в футеровке горна и линии разгара огнеупоров.

Заключение

Опыт внедрения системы на реальных доменных печах показал ее эффективность и превосходство над аналогичными системами, обусловленное следующими особенностями:

- высокая скорость вычислений, обеспечивающая организацию мониторинга в реальном времени, в режиме 24/7;
- построение трехмерной модели разгара с использованием методов адаптивной интерполяции;
- отказ от использования заранее просчитанных профилей разгара, что позволяет гибко подходить к построению профиля разгара горна;
- небольшая площадь отдельных контролируемых сегментов;
- возможность использования программного обеспечения в уже существующих системах сбора данных от термопар в кладке печи;

– предусмотрена возможность адаптации математической модели разгара к каждой обследуемой печи за счет оригинального алгоритма анализа фактической теплопроводности огнеупоров.

Эту систему целесообразно использовать совместно с одной из акустических систем, например, разработкой фирмы Hatch, Канада [19], при этом последняя будет использоваться периодически, например один раз в год.

Данная инновационная разработка «Система контроля состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи» отмечена следующими наградами: звание лауреата выставки и серебряная медаль «Металл-Экспо 2014» за разработку и внедрение в эксплуатацию оборудования и технологий, отвечающих современному техническому уровню; премия губернатора Свердлов-

ской области в сфере информационных технологий (2015 г.) в номинации “За продвижение новых продуктов в сфере информационных технологий, разработанных организациями Свердловской об-

ласти”; диплом 1-й степени и золотая медаль Петербургской технической ярмарки (2016 г.) в номинации “Лучший инновационный проект в области металлургии”.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаврилов Е.Е., Ульянов А.Г., Канаев В.В., Можаренко Н.М. Диагностирование состояния футеровки металлоприемника доменной печи по тепловым нагрузкам // *Сталь*. 1987. № 1. С. 13–15.
2. Шульте М., Клима Р., Рингель Д., Фосс М. Контроль износа горна доменной печи с помощью датчиков теплового потока // *Черные металлы*. 1998. № 4. С. 17–22.
3. Лежнев Г.П., Прохоров И.Е., Шпонько А.А. Применение акустических методов диагностики для определения состояния огнеупорной футеровки, профиля работающей доменной печи и разработки технологических решений // *Доменное производство – XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков*. — М.: Кодекс, 2010. С. 374–378.
4. А. с. 1632978 СССР. Устройство для контроля износа футеровки / В.Е. Левченко, Л.П. Головский, П.Г. Васильев и др. // *Открытия. Изобретения*. 1991. № 9.
5. Кудинов Г.А., Кришталь В.А., Лысенко Е.Е. Компьютерная диагностика разгара огнеупорной кладки горна и лещади доменных печей // *Сталь*. 1997. № 10. С. 10–12.
6. Контроль износа огнеупорной футеровки доменной печи завода Solmer с помощью радиоактивных изотопов // *Реферативный журнал. Реф. ЗВ183*, 1986.
7. Замосковцев Д.Е. Определение состояния горна, лещади и шахты доменных печей с помощью ультразвука // *Доменное производство – XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков*. — М.: Кодекс, 2010. С. 460–464.
8. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос: учебное пособие для вузов. — М.: Академкнига, 2002. — 455 с.
9. Zhao Hong-bo, Huo Shou-feng, Cheng Shu-sen. Study on the early warning mechanism for the security of blast furnace hearths // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2013. Vol. 20. № 4. P. 345–353.
10. Спирин Н.А., Федулов Ю.В., Новиков В.С. и др. Диагностика состояния футеровки доменных печей по температурному полю кладки // *Сталь*. 1997. № 10. С. 13–16.
11. Макиенко В.Г., Думбур Р.С., Русских В.П. и др. Автоматическая система диагностики состояния футеровки металлоприемника, лещади и продления кампании доменной печи // *Доменное производство – XXI век. Труды Международного конгресса доменщиков*. — М.: Кодекс, 2010. С. 491–497.
12. Chen Liangyu, Li Yu. Calculation and application of erosion profile of BF hearth linings // *Sciencepaper Online*. 2009. 8. P. 616–620 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.paper.edu.cn>. (in Chinese).
13. Система контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КТГМК “Криворожсталь” / Н.М. Можаренко, Д.Н. Тогобицкая, Г.В. Панчоха и др. // *Сборник трудов междунар. научно-техн. конф.* — Кривой Рог, КТГМК “Криворожсталь”, 2004. С. 511–514.
14. Кравцова О.А. Алгоритмизация систем диагностики состояния элементов конструкций металлургических агрегатов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Томск, 2009. — 23 с.
15. Пат. 2179583 РФ, МПК С 21 В 5/00. Способ создания защитного гарнисажа в доменной печи / В.Н. Логинов, А.В. Захаров, В.И. Нетронин, И.Ф. Курунов, В.А. Шатлов, В.В. Филиппов, А.Ю. Чернавин // *Заявл.* 28.11.2000; *опубл.* 20.02.2002.
16. Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Чэнь К., Иванов О.Ю., Золотых М.О. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи // *Сталь*. 2013. № 11. С. 8–14.
17. Dmitriev A.N., Zolotikh M.O., Chesnokov Y.A., Ivanov O.Yu., Vitkina G.Yu. The Determination of Thermocouples Optimum Number in the Blast Furnace Hearth for Control of Its Condition // *Applied Mechanics and Materials*. 2015. Vol. 741. P. 302–308.
18. Dmitriev A.N., Zolotikh M.O., Chesnokov Y.A., Ivanov O.Yu., Vitkina G.Yu. The Estimation of the Thermal Properties of Refractory Materials According to the Temperatures Acceleration Curve at the Blast Furnace Blowing-in // *Advanced Materials Research*. 2015. Vol. 1095. P. 476–482.
19. Sadri A., Ying W., Chataway D., Gordon Y. Principles for Blast Furnace Refractory Lining Inspection, and Monitoring using Acoustic and Ultrasonic Technologies. *Proceedings of AISTECH 2016*. May 16–19. 2016 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.hatch.ru/en/About-Us/Publications/Technical-Papers/2016/05/Principles-for-Blast-Furnace-Refractory-Lining-Inspection-Monitoring-using-Acoustic-Ultrasonic>.

COMPARATIVE TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF CONTROL SYSTEMS OF BLAST FURNACE HEARTH LINING DETERIORATION

A. N. DMITRIEV¹, HD (Tech), actual member of RAEN, actual member of Russian Academy of Engineer Sciences, chief research assistant of laboratory of ferrous metals pyrometallurgy, andrey.dmitriev@mail.ru;
M. O. ZOLOTYKH¹, PhD (Tech), leading engineer of laboratory of ferrous metals pyrometallurgy;
K. CHEN², chief representative in Russian Federation, skkont@163.com;
G. YU. VIT'KINA¹, PhD (Tech), RESEARCH Assistant of laboratory of ferrous metals pyrometallurgy
(¹ Institute of Metallurgy, Ural branch of Russian Academy of Sciences, Russia Ekaterinburg;
² Metallurgical Designing Institute of Shandong province, China, Jinan)

Abstract. For safe and effective operation of a blast furnace it is important to know the residual thickness of the blast furnace hearth lining any time, first of all the location of the damaged areas. Use of traditional methods of hearth and bottom lining control often lead to a mistaken diagnostics.

Institute of metallurgy of Ural branch of Russian academy of Sciences elaborated a mathematical model, providing a 3-dimensional estimation of the lining status and optimization of calculations for operation in real time mode.

The calculation is done by solving equations of heat conductivity by usage of a number of temperature sensors (up to 700), implemented into furnace lining between refractory blocks. Calculation algorithm was modified by application of sampling theorem to take into account the complex profile of the blast furnace lower part. A system of information collection, processing and passing used from the sensors to program data base. A continuous control of temperature variation in every point enables to determine a current lining refractory thickness and notify the furnace personal in advance about beginning of the lining erosion. The elaborated program interface enables the furnace foreman to use additional control functions, in particular, the residual lining thickness, including: direct visualization of the status and tendencies of the erosion change, temperature distribution in every point of the lining at computer monitor, signaling about dangerous zone; volume temperature distribution (isotherms) and tendencies of their changes. The interface languages available as following: Chinese, English, Russian.

Key words: blast furnace; refractory lining; diagnostics; thermocouples; mathematical model.

For citation: Dmitriev A.N., Zolotikh M.O., Chen' K., Vit'kina G.Yu. Comparative technological analysis of control systems of blast furnace hearth lining deterioration. *Chernaya metallurgiya. Byulleten nauchno-tehnicheskoy i ekonomicheskoy informacii = Ferrous metallurgy. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2018, no. 8, pp. 82–91. (In Russ.).

Doi: 10.32339/0135-5910-2018-8-82-91

REFERENCES

1. Gavrilov E.E., Ul'yanov A.G., Kanaev V.V., Mozhareno N.M. Diagnostic of lining status of crucible by heat loads. *Stal'*, 1987, no. 1, pp. 13–15. (In Russ.).
2. Shul'te M., Klima M., Ringel' D., Foss M. Control of blast furnace hearth wear by sensors of heat flow. *Cherny'e metally'*, 1998, no. 4, pp. 17–22. (In Russ.).
3. Lezhnev G.P., Proxorov I.E., Shpon'ko A.A. [Use of diagnostic acoustic methods for determining of refractory lining status, of working blast furnace profile and elaboration of technology solutions]. *Domennoe proizvodstvo – XXI vek. Trudy' Mezhdunarodnogo kongressa domenshnikov* [Blast-furnace ironmaking – XXI century. Proceedings of the International Congress of Blast Furnace] Moscow: Kodeks, 2010, pp. 374–378. (In Russ.).
4. Levchenko V.E., Golovskij L.P., Vasil'ev P.G. etc. *Ustrojstvo dlya kontrolya iznosa futerovki* [A facility for lining wear control]. A. S. USSR no. 1632978. *Byulleten' "Otkry'tiya. Izobreteniya"*, 1991, no. 9. (In Russ.).
5. Kudinov G.A., Krishtal' V.A., Ly'senko E.E. Computer diagnostic of hearth refractory laying and of crucible of blast furnaces. *Stal'*, 1997, no. 10, pp. 10–12. (In Russ.).
6. Refractory lining wear control at Solmer plant blast furnace by radioactive isotopes. *Referativny'j zhurnal VINITI "Proizvodstvo chuguna i stali"*, 1986, no. 3, ref. 3B183. (In Russ.).
7. Zamoskovcev D.E. [Determining of hearth, crucible and shaft status by ultrasound]. *Domennoe proizvodstvo – XXI vek. Trudy' Mezhdunarodnogo kongressa domenshnikov* [Blast-furnace ironmaking – XXI century. Proceedings of the International Congress of Blast Furnace] Moscow: Kodeks, 2010, pp. 460–464. (In Russ.).
8. Telegin A.S., Shvy'dkij V.S., Yaroshenko Yu.G. *Teplomassopereenos: uchebnoe posobie dlya vuzov* [Heat and mass transfer: textbook for high schools]. Moscow: Akademkniga, 2002. 455 p. (In Russ.).
9. Zhao Hong-bo, Huo Shou-feng, Cheng Shu-sen. Study on the early warning mechanism for the security of blast furnace hearths. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 2013, vol. 20, no. 4, pp. 345–353.
10. Spirin N.A., Fedulov Yu.V., Novikov V.S., Shvy'dkij V.S., Lavrov V.V. Diagnostic of blast furnace lining status by temperature field of the laying. *Stal'*, 1997, no. 10, pp. 13–16. (In Russ.).
11. Makienko V.G., Dumbur R.S., Russkix V.P., Vas'kevich M.Ya., Kosolap N.V. [Automatic system of lining status diagnostic of crucible, hearth and blast furnace campaign prolongation]. *Domennoe proizvodstvo – XXI vek. Trudy' Mezhdunarodnogo kongressa domenshnikov* [Blast-furnace ironmaking – XXI century. Proceedings of the International Congress of Blast Furnace] Moscow: Kodeks, 2010, pp. 491–497. (In Russ.).
12. Chen Liangyu, Li Yu. Calculation and application of erosion profile of BF hearth linings. *Sciencepaper Online*, 2009, no. 8, pp. 616–620. Electronic resource. Available at URL: <http://www.paper.edu.cn>. (in Chinese)
13. Mozhareno N.M., Togobiczkaya D.N., Panchoxa G.V., Orel G.I., Kostenko G.P., Listopadov V.S., Dubinchuk V.L. [Control system of crucible lining deterioration and heat products formation in blast furnaces KGGMK "Krivorozhstal'"]. *Sbornik trudov mezhdunarodnoj nauchno-texnicheskoy konferencii – Krivoj Rog, KGGMK "Krivorozhstal'"* [Collection of works of the international scientific and technical conference – Krivoy Rog, KGGMK "Krivorozhstal'"]. 2004, pp. 511–514. (In Russ.).

14. Kravcova O.A. *Algoritmizatsiya sistem diagnostiki sostoyaniya elementov konstrukcij metallurgicheskikh agregatov: Avtoref. dis. ... cand. tekhn. nauk* [Algorithmization of status diagnostic systems of metallurgical facilities elements. Extended Abstract of Cand. Sci. Diss.]. Tomsk, 2009, 23 p. (In Russ.).
15. Loginov V.N., Zaxarov A.V., Netronin V.I., Kurunov I.F., Shatlov V.A., Filippov V.V., Chernavin A.Yu. *Sposob sozdaniya zashchitnogo garnisazha v domennoj pechi* [A method of creation of protective scull in blast furnace]. Patent RF no. 2179583. IPC C 21 B 5/00. 2002. (In Russ.).
16. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Ch'en' K., Ivanov O.Yu., Zoloty'kh M.O. Control system of blast furnace refractory lining deterioration. *Stal'*, 2013, no. 11, pp. 8–14. (In Russ.).
17. Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Chesnokov Y.A., Ivanov O.Yu., Vitkina G.Yu. The Determination of Thermocouples Optimum Number in the Blast Furnace Hearth for Control of Its Condition. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 741, pp. 302–308.
18. Dmitriev A.N., Zolotykh M.O., Chesnokov Y.A., Ivanov O.Yu., Vitkina G.Yu. The Estimation of the Thermal Properties of Refractory Materials According to the Temperatures Acceleration Curve at the Blast Furnace Blowing-in. *Advanced Materials Research*, 2015, vol. 1095, pp. 476–482.
19. Sadri A., Ying, W., Chataway, D., Gordon, Y. Principles for Blast Furnace Refractory Lining Inspection, and Monitoring using Acoustic and Ultrasonic Technologies. *Proceedings of AISTECH 2016. May 16–19. 2016*. Electronic resource. Available at URL: <https://www.hatch.ru/en/About-Us/Publications/Technical-Papers/2016/05/Principles-for-Blast-Furnace-Refractory-Lining-Inspection-Monitoring-using-Acoustic-Ultrasonic>.