



А. К. Тараканов /д. т. н./, В. П. Иващенко /д. т. н./,
О. О. Еремин /д. т. н./, А. В. Сибир /к. т. н./
Национальная металлургическая академия
Украины

В. П. Лялюк /д. т. н./, Д. А. Кассим /к. т. н./
Металлургический институт Кременчугского
национального университета

Контроль состояния футеровки металлоприемника доменной печи

Разработанная система обеспечивает надежный отдельный контроль толщины неразрушенной углеродистой футеровки и толщины неустойчивого гарнисажа за счет анализа разницы в показаниях термомпар, заложенных в футеровку вдоль каждого радиуса контроля, на протяжении длительного периода работы системы контроля, желательно – с момента начальной задувки печи. Максимально достигаемая разность температур свидетельствует о максимальном тепловом потоке и соответствует периоду работы доменной печи, когда неустойчивый гарнисаж в месте контроля отсутствует. В этом случае, имея информацию о разности температур и о паспортной теплопроводности огнеупора, путем решения обратной задачи теплопроводности вычисляют толщину неразрушенной футеровки. Текущую толщину гарнисажа с заданной теплопроводностью определяют при текущей разности показаний термомпар одного радиуса по величине дополнительного теплового сопротивления гарнисажа на каждом радиусе, выбранном для контроля. (Ил. 6. Библиогр.: 8 назв.).

Ключевые слова: доменная печь, футеровка металлоприемника, контроль, эрозия углеродистых блоков, нарастание гарнисажа.

The suggested control system ensures the separate control in blast-furnace well lining of both: the erosion of carbonic blocks and the growing of scull on them. The control becomes possible owing to analysis of temperatures which are measuring in at least two points along each radius of control in carbonic lining for the space of long time. When difference in temperatures along a control radius is maximal it stands for the period of blast furnace functioning when the scull on carbonic blocks is absent. At this time the thickness of residual carbonic lining is determined by means of solving the inverse problem of thermal conductivity. The current thickness of scull is determined in the same way with due regard for additional thermal resistance of scull under the conditions of current difference in measuring temperatures.

Key words: blast furnace, well linind, control, erosion of carbonic brocks, growing of scull.

Физическая постановка задачи

Надежный оперативный контроль изменений профиля рабочего пространства металлоприемника доменной печи необходим для предотвращения опасных аварий, связанных с прорывами горна, для продления кампании работы доменной печи, а также для регистрации заростания горна и корректировки текущего технологического режима плавки.

Известно большое количество методов диагностики разгара огнеупорной кладки горна доменных печей. Наибольшее распространение получили методики, основанные на измерении температур внутри кладки с помощью термомпар, закладываемых в тело углеродистых блоков, которыми футеруются металлоприемники доменных печей [1–4].

Многие системы контроля состояния футеровки горна доменных печей дают в качестве выходной величины картину распределения температур в теле футеровки [4]. Выход расчетной изотермы 1135 °С (температуры плавления чугуна) за границы проектного профиля футе-

ровки внутрь или наружу трактуется либо как разгар футеровки, либо как нарастание на ней гарнисажа.

При проектировании систем контроля во многих случаях уделяется недостаточное внимание вопросам повышения точности контроля состояния футеровки горна за счет рационального расположения термомпар в теле футеровки. Иногда для расчетов используют задаваемую температуру тела холодильников горна без достоверного контроля тепловых сопротивлений между холодильниками и кладкой. Большое значение имеет также оптимальность структуры расчетной модели.

В процессе эксплуатации доменной печи поверхность углеродистых блоков, контактирующая с жидкими продуктами плавки, может перерождаться и разрушаться. В противоположность этой тенденции на рабочей поверхности углеродистых блоков образуется гарнисаж. В районе металлоприемника основой слоя устойчивого гарнисажа, который может образовываться на поверхности углеродистых блоков,

является углерод, который выделяется из чугуна, в целом насыщенного углеродом за счет растворения углерода кокса и даже пересыщенного углеродом в слоях охлажденного чугуна, контактирующего со стенками футеровки. Остывание чугуна, имеющего температуру примерно 1500 °С, до температуры затвердевания понижает растворимость углерода в металле примерно на 0,8 %.

Неустойчивый гарнисаж состоит в основном из кусочков кокса, скрепленных застывшим чугуном. Поэтому температура внутренней поверхности гарнисажа равна 1135 °С – температуре плавления чугуна. Теплопроводность неустойчивого гарнисажа, по меньшей мере, в 3 раза ниже теплопроводности углеродистых блоков.

Толщину углеродистой футеровки можно оценить, имея полную информацию о тепловых потоках через эту футеровку, желательнее с начала эксплуатации печи после капитального ремонта первого разряда. В самом начале эксплуатации футеровка еще цела, и гарнисаж практически отсутствует. В дальнейшем толщину неразрушенной части футеровки можно оценивать в периоды максимальных тепловых потоков, когда неустойчивая часть гарнисажа уходит, и если остается, то только углеродистый гарнисаж, по физическим и теплотехническим характеристикам близкий к углеродистым блокам.

Задача определения толщины футеровки в вертикальных сечениях по показаниям термопар решается с учетом условий теплообмена в теле футеровки.

Математическая модель процесса передачи теплоты в футеровке печи и решение поставленной задачи

Уравнение, описывающее распределение температур в футеровке горна в предположении, что передача теплоты происходит симметрично относительно оси, имеет вид [5]:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial h^2} \right) = 0 \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); t – температура, К; r – направление по радиусу, м; h – направление по оси, м.

Граничными условиями для данного дифференциального уравнения являются граничные условия первого рода в виде измеряемых температур в известных точках по радиусу и высоте горна доменной печи.

Поставленная двухмерная задача может быть решена с использованием локально-одномерного подхода, применяемого при реше-

нии нестационарных задач теплопроводности [6]. Данный подход заключается в том, что искомая температура $t(r, h)$ определяется как сумма тепловых воздействий по каждому направлению (радиусу и высоте). Основной перенос теплоты в футеровке осуществляется по радиусу, поэтому сначала рассчитываются тепловые потоки по радиусам печи, основываясь на показаниях термопар в каждом поясе. Полученное значение теплового потока в стационарном состоянии считается на данном этапе расчета постоянным по радиусу футеровки в пределах пояса, для которого он был рассчитан. Температуры, рассчитанные по значениям тепловых потоков вдоль радиуса, уточняются с учетом переноса теплоты по высоте печи.

Количество теплоты, предающееся по радиусу футеровки в стационарном состоянии, определяется по формуле:

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \frac{t_1 - t_2}{\ln(r_2/r_1)}, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где l – высота пояса, м; t_1, t_2 – температуры в точках 1 и 2, °С; r_1, r_2 – радиусы точек 1 и 2, м.

Если вдоль радиуса установлены 3 термопары, для более точного определения температурных полей используется сравнение и уточнение тепловых потоков, рассчитанных по показаниям термопар 1 и 3, а также термопар 1 и 2.

Температура внутри каждого слоя может быть оценена следующим образом:

$$t_x = t_1 - \frac{Q \cdot \ln(r_x/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l}, \quad (3)$$

где t_x – температура в искомой точке, °С; r_x – радиус точки x , м.

Для случая, если футеровка состоит из элементов, имеющих различный коэффициент теплопроводности, температура определяется по выражению:

$$t_x = t_1 - \frac{Q}{R}, \quad (4)$$

где $R = \frac{1}{l} \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi\lambda_i} \ln(r_{i+1}/r_i)$ – тепловое сопротивление цилиндрической стенки, (м² · °С)/Вт; λ_i – теплопроводность i -го слоя футеровки, Вт/(м · °С); r_i, r_{i+1} – радиусы начала и конца слоя с теплопроводностью λ_i , м.

Удельный тепловой поток, передающийся по высоте печи, определяется по выражению:

$$q = \lambda \frac{t_{l1} - t_{l2}}{\Delta l}, \text{ Вт/м}^2, \quad (5)$$

где Δl – расстояние по высоте между двумя точками, в которых определены значения температур t_{l1} и t_{l2} .

В работе [7] показано, что с ростом температуры теплопроводность углеродистых блоков изменяется примерно в таких масштабах: от 8,5 Вт/(м · К) при температуре 100 °С до 10,5 Вт/(м · К) при температуре 800 °С. Зависимость теплопроводности углеродных блоков от температуры носит линейный характер. В модели может использоваться среднее значение теплопроводности, вычисленное для средней температуры футеровки при логарифмическом усреднении вдоль радиуса цилиндрической стенки. Но такое значение теплопроводности может иметь значительную погрешность из-за недостаточной точности паспортной теплопроводности углеродистых блоков и коэффициентов влияния температуры на теплопроводность. Поэтому желательно использовать в модели контроля состояния футеровки горна расчетный коэффициент теплопроводности разогретой огнеупорной кладки, который может фиксироваться в периоды гарантированного отсутствия неустойчивого гарнисажа на углеродистой футеровке при наличии трех термопар на радиусе или дополнительной системы контроля тепловых потоков по теплосъемам на холодильниках.

Методика расчетной оценки разгара горна

Разработанная методика обеспечивает раздельный контроль неразрушенной огнеупорной футеровки и толщины неустойчивого гарнисажа за счет анализа разницы в показаниях термопар, заложенных в периферийные углеродные блоки вдоль каждого радиуса контроля (сечения), на протяжении длительного времени работы системы контроля [8]. Максимально достигаемая разность температур свидетельствует о максимальном тепловом потоке и соответствует периоду работы доменной печи, когда неустойчивый гарнисаж в месте контроля отсутствует. Устойчивый гарнисаж, если он есть, состоит в основном из углерода, выделившегося из чугуна, имеет плотную структуру и по свойствам мало отличается от исходной футеровки. Исследование образцов футеровки, отобранных во время капитальных ремонтов первого разряда, показало, что сколько-нибудь четкая граница между исходным материалом блока и устойчивым гарнисажем отсутствует.

При достигаемом за контрольный период работы максимуме разности температур вдоль радиуса контроля определяется толщина в месте контроля углеродистой футеровки с учетом ее теплопроводности.

Текущую толщину неустойчивого гарнисажа с заданной теплопроводностью определяют при текущей разности показаний термопар вдоль одного радиуса по величине дополнительного

теплового сопротивления гарнисажа на каждом радиусе (в каждом секторе), выбранном для контроля.

Каждый цикл расчета начинается с оценки величины теплового потока через цилиндрическую стенку металлоприемника в месте контроля по формуле (3).

Если в месте контроля наблюдается максимальный тепловой поток за анализируемый период (максимальная разность в показаниях термопар), рассчитывается и запоминается толщина устойчивой углеродистой футеровки. Расчет сводится к решению обратной стационарной задачи теплопроводности.

Метод контроля состояния футеровки металлоприемника реализуется следующим образом.

Определяется координата футеровки при максимальном тепловом потоке:

$$r_{\phi} = r_m \exp\left(-\frac{2\pi l \lambda_{\phi} (t_{\theta n} - t_m)}{Q}\right), \quad (6)$$

где r_{ϕ} – радиус футеровки, м; $t_{\theta n}$ – температура внутренней поверхности футеровки, °С; r_m – радиус закладки термопары, м; t_m – температура, регистрируемая термопарой, °С; Q – тепловой поток, Вт; λ_{ϕ} – теплопроводность футеровки, Вт/(мК); l – высота блока, м.

При текущем тепловом потоке, который меньше максимально достигнутого, определяется суммарное тепловое сопротивление цилиндрической стенки по формуле:

$$R_{\Sigma} = \frac{t_{\theta n} - t_m}{Q}, \quad (7)$$

где R_{Σ} – суммарное тепловое сопротивление футеровки и неустойчивого гарнисажа, (м² К)/Вт; Q – тепловой поток, Вт; $t_{\theta n}$ – температура внутренней поверхности гарнисажа, °С; t_m – температура, регистрируемая термопарой, °С.

Суммарное тепловое сопротивление может быть представлено как:

$$R_{\Sigma} = R_{\phi} + R_e, \quad (8)$$

где R_{ϕ} – тепловое сопротивление футеровки, (м² К)/Вт; R_e – тепловое сопротивление гарнисажа, (м² К)/Вт.

Тепловое сопротивление футеровки рассчитывается по формуле:

$$R_{\phi} = \frac{\ln(r_m/r_{\phi})}{2\pi l \lambda_{\phi}}. \quad (9)$$

Радиус внутренней поверхности слоя гарнисажа определяется по формуле:

$$r_e = r_{\phi} \exp(-R_e 2\pi l \lambda_e), \quad (10)$$

где r_e – радиус гарнисажа, м; R_e – тепловое сопротивление гарнисажа, которое рассчитывается из

формулы (9), $(\text{м}^2 \text{ К})/\text{Вт}$; λ_2 – теплопроводность гарнисажа, $\text{Вт}/(\text{мК})$.

Проверка адекватности оценки состояния футеровки горна

Для проверки модели были проведены расчеты радиусов неразрушенной части футеровки и гарнисажа на уровнях +6200 и +7200 мм, по которым имелись данные исследований состояния футеровки при выдувке печи и ретроспективная информация о показаниях термопар. Результаты расчета по математической модели представлены в виде полярных графиков для двух уровней и графиков, отражающих динамику изменения радиусов футеровки и гарнисажа в течение года накануне выдувки печи.

На полярных диаграммах (рис. 1 и 2) жирными линиями показаны проектные радиусы (внутренние и наружные радиусы футеровки). Тонкой сплошной линией на этих графиках показаны рассчитанные по предложенной методике радиусы неразрушенной футеровки, а тонкой пунктирной линией – радиус внутренней поверхности гарнисажа.

Примеры графиков изменения радиусов футеровки и гарнисажа в течение анализированного года показаны на рис. 3 и 4. Верхняя линия на этих графиках соответствует радиусу не-

разрушенной футеровки, а нижняя – радиусу гарнисажа. Ось x соответствует времени в днях, а ось y – это радиус в метрах.

Было получено очень хорошее совпадение результатов расчетной оценки толщины углеродистой футеровки перед выдувкой печи с фактической толщиной футеровки по результатам обследования горна после выдувки печи.

Расчеты разгара футеровки доменной печи после ее реконструкции

По данным показаний термопар и с использованием математической модели были проведены расчеты радиусов неразрушенных углеродных блоков в каждом из 16 сечений пяти поясов углеродистых блоков, которыми футерованы стенки металлоприемника. Данные, регистрируемые термопарами за первые 30 дней эксплуатации печи, не учитывались, т. к. имели много нулевых или неадекватных значений. Пример расчетов представлен в виде полярной диаграммы для одного из поясов через 100 дней после ввода печи в эксплуатацию (рис. 5).

На рис. 6 приведен пример графиков изменения радиуса гарнисажа во времени в 14-м сечении для 1–4 поясов. Оси x соответствуют времени в днях от задувки печи, а ось y – радиусу в

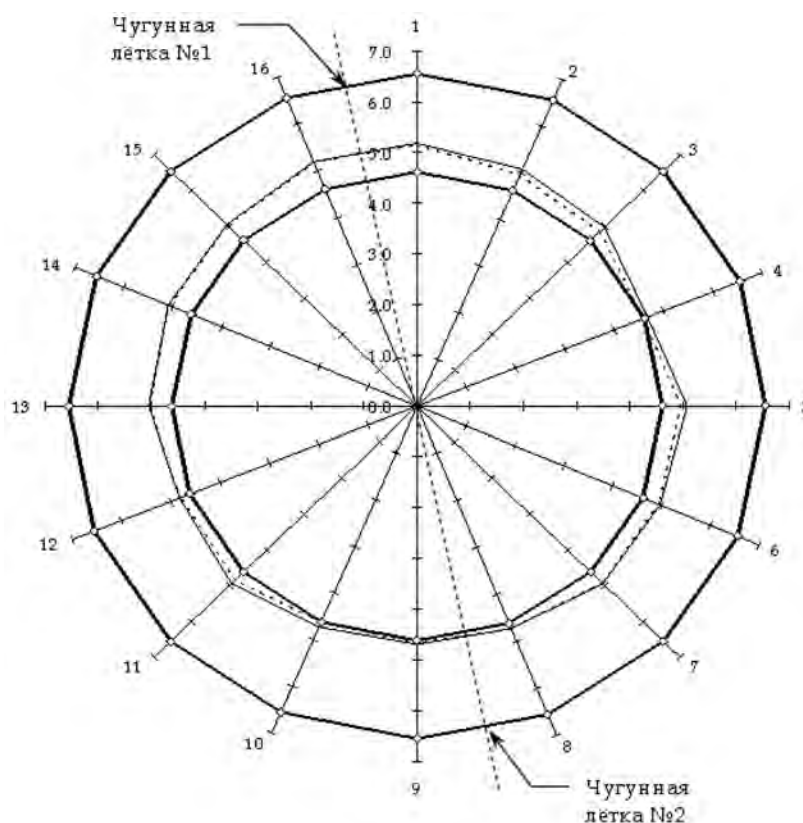


Рис. 1. Границы исходной футеровки (толстые линии) и расчетные значения остаточной футеровки (тонкая линия) и слоя гарнисажа (пунктирная линия) на уровне +6200 мм от низа лещади накануне выдувки печи

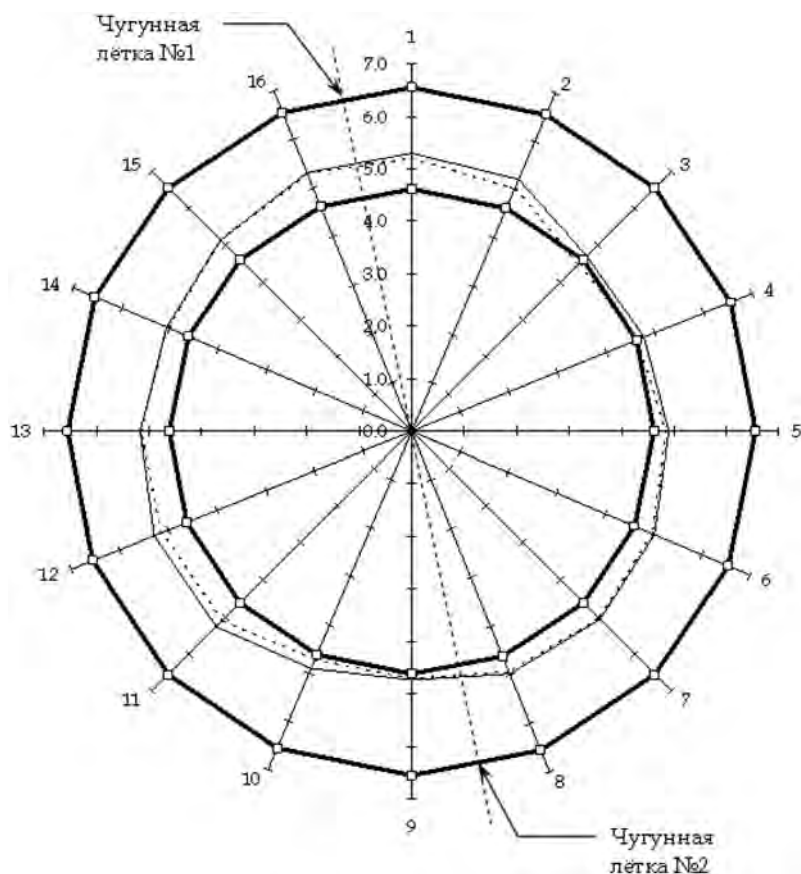


Рис. 2. Границы исходной футеровки (толстые линии) и расчетные значения остаточной футеровки (тонкая линия) и слоя гарнисажа (пунктирная линия) на уровне +7200 мм накануне выдувки печи

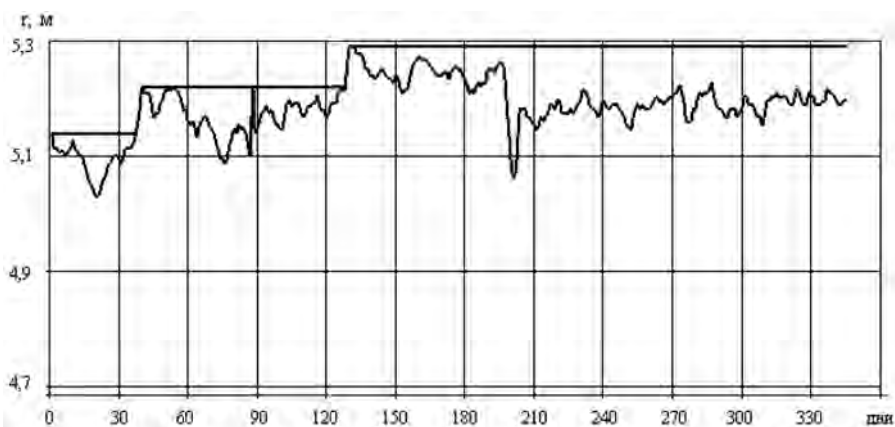


Рис. 3. Изменение радиуса футеровки и гарнисажа в 1-м сечении на уровне +7200 мм

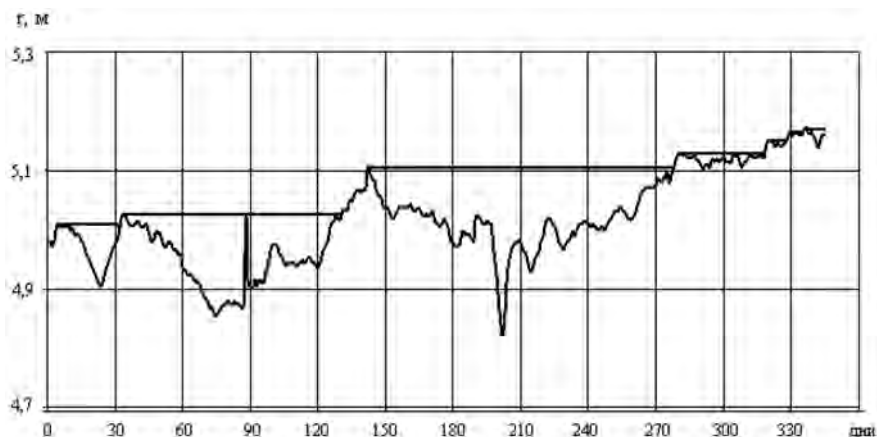


Рис. 4. Изменение радиуса футеровки и гарнисажа в 13-м сечении на уровне +7200 мм

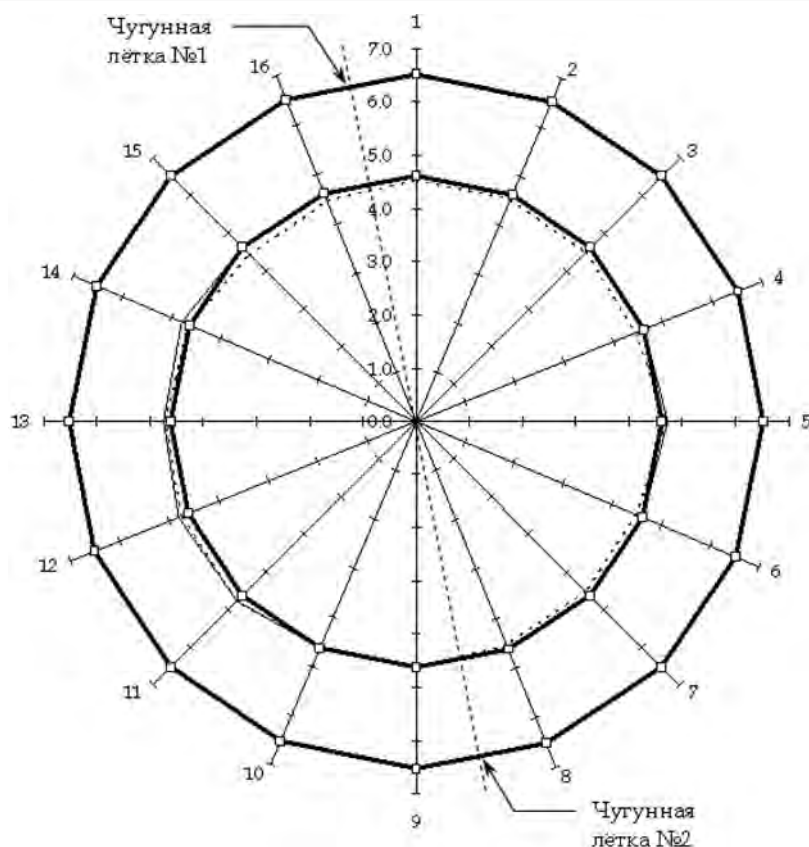


Рис. 5. Состояние футеровки и гарнисажа на уровне четвертого пояса блоков, которыми футерованы стенки металлоприемника, на 100-й день после задувки печи

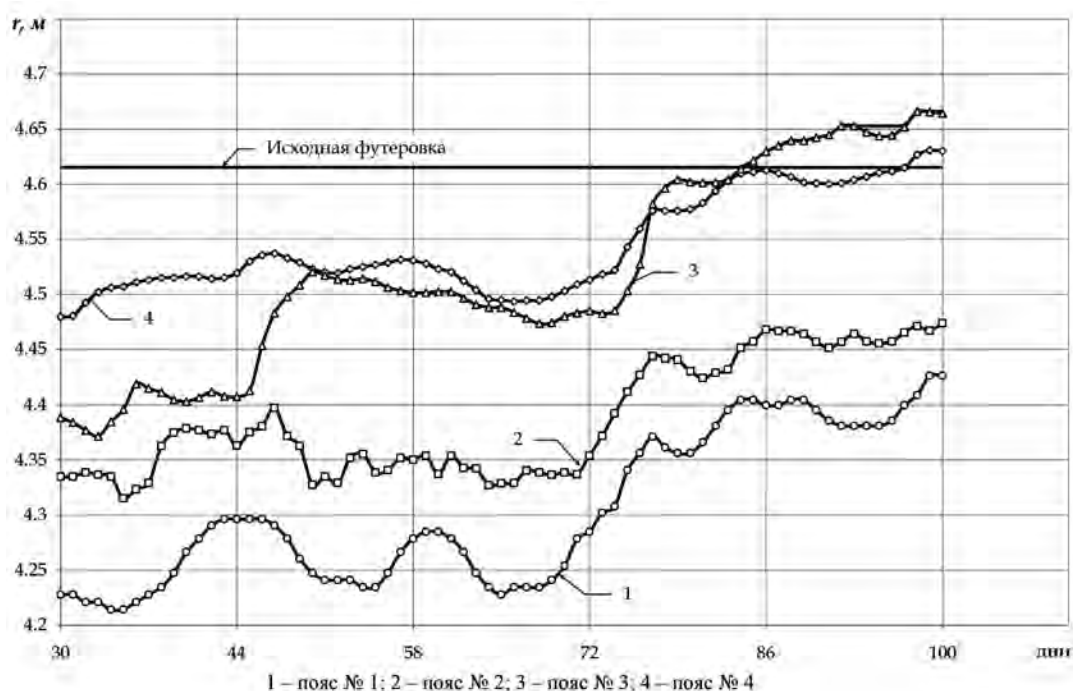


Рис. 6. Изменение радиуса гарнисажа и углеродистых блоков в 14-м сечении для 1-4 поясов в период от 30 до 100 дней после задувки

метрах. Изменение толщины гарнисажа оказалось очень важной информацией для корректировки технологического режима работы доменной печи.

Выводы

1. Надежный отдельный контроль состояния углеродистой футеровки металлоприемника доменной печи и толщины неустойчиво-

го гарнисажа возможен при наличии достаточного количества заложенных в углеродистые блоки термопар и обязательного непрерывного анализа величин тепловых потоков в кладке, желательного с момента задувки печи.

2. Оперативный контроль толщины гарнисажа в горне печи позволяет не только предотвращать разгар футеровки, но и оптимизировать технологический режим доменной плавки, в частности режим промывок горна.

Библиографический список

1. Серов Ю. В. Новые информационные технологии контроля работы горна доменных печей / Ю. В. Серов, В. Г. Макиенко, В. Н. Бражко [и др.] // Сталь. – 1997. – № 10. – С. 4–9.

2. Спириин Н. А. Диагностика состояния футеровки доменных печей по температурному полю кладки / Н. А. Спириин, Ю. В. Федулов, В. С. Новиков [и др.] // Сталь. – 1997. – № 10. – С. 13–16.

3. Системы контроля разгара футеровки металлоприемника и формирования продуктов плавки в доменных печах КГГМК «Криворожсталь» / Н. М. Можаренко, Д. Н. Тогобицкая,

Г. В. Панчоха [и др.] // Сб. «Теория и практика производства чугуна». – Кривой Рог: КГГМК «Криворожсталь», 2004. – С. 511–514.

4. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи / А. Н. Дмитриев [и др.] // Сталь. – 2013. – № 11. – С. 8–14.

5. Румянцев В. Д. Теория тепло и массообмена / В. Д. Румянцев. – Днепропетровск: Пороги, 2006. – 532 с.

6. Арутюнов В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 267 с.

7. Ильченко К. Д. Теплофизические свойства углеродистых футеровочных материалов / К. Д. Ильченко, М. Б. Ревенко // Металлургическая теплотехника. Сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: НМетАУ, 2009.

8. Спосіб контролю стану футерівки металоприймача доменної печі / А. К. Тараканов, В. П. Іващенко, О. О. Єрємін, А. В. Сибір, В. П. Лялюк / Патент України № 54485 від 10.11.2010 року. – Бюл. № 21.

Поступила 27.01.2016



УДК 669.162

Производство

Д. А. Кассим /к. т. н./, В. П. Лялюк /д. т. н./
Металлургический институт Криворожского
национального университета

А. К. Тараканов /д. т. н./

Национальная металлургическая академия
Украины

В. С. Листопадов, Д. В. Пинчук
ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог»

Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива

Предложена методика определения теоретической температуры горения у фурм при вдувании в горн природного газа и/или пылеугольного топлива с использованием оперативной информации о параметрах дутья, расходах природного газа и пылеугольного топлива, снимаемых с контрольно-измерительных приборов, а также систем контроля и управления доменной печью. (Табл. 2. Библиогр.: 10 назв.).

Ключевые слова: теоретическая температура горения, дутье, природный газ, пылеугольное топливо.

Proposed the method of determining the theoretical combustion temperature at tuyeres while blowing the natural gas into the furnace and/or pulverized coal, with using of operational information about the parameters of blast, consumptions of natural gas and pulverized coal, which remove from control instrumentation and automation systems on the Central control panel of the blast furnace.

Key words: theoretical combustion temperature, blast, natural gas, pulverized coal