

Математическая модель тепловой работы воздушной фурмы доменной печи

Разработана математическая модель теплового состояния фурмы доменной печи, которая позволяет рассчитывать температурное поле тела фурмы в штатном режиме эксплуатации, при наличии дефектов структуры, при использовании защитных покрытий, а также при контакте фурмы с жидким чугуном.

Ключевые слова: математическая модель, воздушная фурма, доменная печь, дефекты структуры, защитное покрытие, интегро-интерполяционный метод, дифференциальное уравнение

Повышение надежности и увеличение срока эксплуатации воздушных фурм доменных печей оказывают существенное влияние на технико-экономические показатели работы печи и, соответственно, на себестоимость чугуна.

Основным элементом фурмы, определяющим её стойкость, является литое медное водоохлаждаемое рыльце, которое выступает из кладки внутрь печи, при этом температура прифурменной зоны достигает 2000 °С. Исследования проводили на фурмах, произведённых и эксплуатировавшихся в условиях ПрАО «Донецксталь» – металлургический завод».

Прогар воздушных фурм приводит к потерям производства, которые связаны как с расходами на приобретение новой фурмы, так и с продолжительными простоями доменной печи, необходимыми для замены фурм. Обобщение и систематизация причин прогара фурм позволили авторам [1] выделить в качестве основных из них: загромождение горна печи коксовым мусором; повышение содержания мелочи в железорудном сырье и выделение сажистого углерода вследствие недожога углеводородов; работа печи на тугоплавких малоподвижных шлаках; нарушение равномерного распределения материалов и газов и просадка гарнисажа и настылей.

При попадании на фурму жидкого чугуна в зоне контакта на водоохлаждаемой поверхности образуется паровая подушка, которая создаёт неохлаждаемый водой очаг, в результате чего происходят деформация и разрушение фурмы [2]. Механизм такого

прогара фурмы предложен в работе [3] и связан с расположением очагов горения у фурм и разрыхлённых зон над ними. При этом продукты плавки накапливаются в ложбине очага горения, постепенно подходя к «рыльной» части фурмы, что приводит к её прогару снизу (рис. 1, а, б). Прогар фурм сверху связан с обнажением «рыльной» части фурмы при разрушении гарнисажа над фурмами при попадании капель перегретого чугуна (рис. 1, в).

Наиболее ответственной деталью при изготовлении фурмы является литое медное «рыльце». Наличие макро- и микропористости, микротрещин и неметаллических примесей, которые образуются при нарушениях технологии выплавки меди и последующей отливки «рылец», оказывает негативное влияние на теплофизические свойства меди, её механические характеристики, что, в свою очередь, в значительной степени определяет продолжительность работы всего изделия. Однако в литературе недостаточно информации о влиянии дефектов структуры на изменение теплового состояния медных воздушных фурм.

Цель настоящего исследования: разработка математической модели теплового состояния фурмы при различных режимах её эксплуатации, учитывающей влияние дефектов отливки на процесс теплопередачи, анализ полученных расчётов и выдача рекомендаций по совершенствованию технологии производства и увеличению срока её эксплуатации.

Для исследования макроструктуры, распределения внутренних пор, подкорковых пузырей, раковин

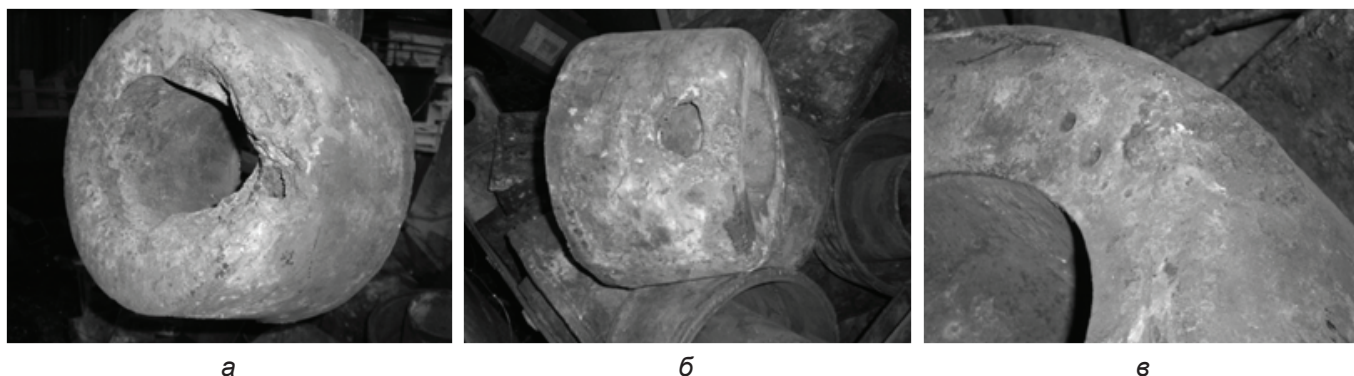


Рис. 1. Разрушение медной поверхности фурмы при различных тепловых режимах её работы: прогаре рыльца фурмы (а, б); локальном оплавлении наружной части рыльца фурмы (в)

и рыхлостей в медной отливке из рыльца вырезали продольный темплет, из которого в дальнейшем отбирали образцы для исследования микроструктуры.

Макроструктуру рыльца выявляли с помощью травления 15%-ным раствором азотной кислоты до получения необходимого для визуального наблюдения и фотосъёмки контраста (рис. 2).

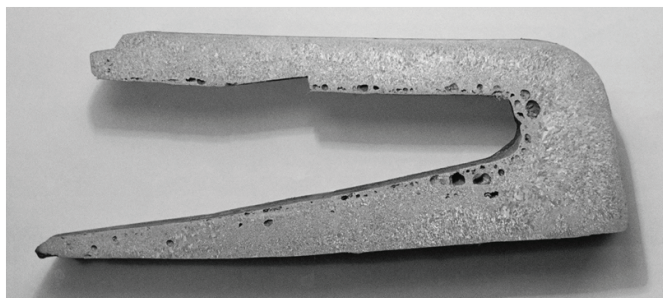


Рис. 2. Макроструктура продольного сечения отливки медного рыльца

Структура отливки в основном плотная, мелкозернистая у поверхности отливки, с выраженной зоной столбчатых кристаллов в средней части отливки. По внутренней поверхности отливки расположена область пор и рыхлостей с глубиной от 5 до 14 мм. Размер пор колеблется в интервале от 1,5 до 7,0 мм. В направлении теплоотвода имеет место расположение как одной, так и двух и более, последовательно расположенных пор, которые являются препятствием при теплопередаче.

Исследования микроструктуры, проведённые с помощью микроскопа «НЕОРНОТ 21» также показали наличие микропор в отливке (рис. 3).

При разработке математической модели ставилась задача получить расчётным путём следующие параметры теплового состояния фурмы:

– при штатном режиме эксплуатации (отсутствие дефектов структуры медной отливки рыльца фурмы без защитного покрытия);

– при наличии подкорковых пузырей;

– при контакте с жидким чугуном с температурой 1460 °С;

– при наличии защитного покрытия.

Схематично расчётная область медной фурмы без защитного покрытия, принятая для математической модели, показана на рис. 4, а, с защитным покрытием – на рис. 4, б. Тепловое состояние рыльной части воздушной фурмы в штатном режиме можно описать следующим дифференциальным уравнением с соответствующими начальным и граничными условиями:

ем – на рис. 4, б. Тепловое состояние рыльной части воздушной фурмы в штатном режиме можно описать следующим дифференциальным уравнением с соответствующими начальным и граничными условиями:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

$$r_a < r < r_d, \quad y_a < y < y_c, \quad (1)$$

где c_p – теплоёмкость материала фурмы, Дж/(кг·К); ρ – плотность материала фурмы, кг/м³; λ – теплопроводность материала фурмы, Вт/(м·К).

Начальные условия:

$$T(r, y, \tau) = T_{\text{нач}}, \quad \text{при } r_a \leq r \leq r_d, \quad y_a \leq y \leq y_c, \quad \tau = 0 \quad (2)$$

Граничные условия:

– на поверхности воздушного канала

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_a} = \alpha_{\Sigma_{\text{воз}}} (T_{\text{воз}} - T_{\text{пов}}), \quad \text{при } y_a \leq y \leq y_c, \quad (3)$$

где $\alpha_{\Sigma_{\text{воз}}}$ – коэффициент теплоотдачи от воздушного потока фурме, Вт/(м²·К); $T_{\text{воз}}$ – температура воздушного потока через фурму, К; $T_{\text{пов}}$ – температура поверхности воздушного канала фурмы, К;

– на передней части рыльной поверхности фурмы

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_a} = \alpha_{\Sigma} (T_{\text{сп}} - T_{\text{пов}}), \quad \text{при } r_a \leq r \leq r_d, \quad (4)$$

где α_{Σ} – коэффициент теплоотдачи от газовой среды к поверхности фурмы в прифурменной зоне, Вт/(м²·К);

$T_{\text{сп}}$ – температура газовой среды в прифурменной зоне;

– на боковой поверхности рыльной части фурмы

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_d} = -\alpha_{\Sigma} (T_{\text{сп}} - T_{\text{пов}}), \quad \text{при } y_a \leq y \leq y_c, \quad (5)$$

– на внутренней поверхности фурмы, охлаждаемой водой

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_c} = -\alpha_{\text{H}_2\text{O}} (T_{\text{пов}}^{\text{вн}} - T_{\text{H}_2\text{O}}), \quad \text{при } y_b < y \leq y_c, \quad (6)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_b} = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} (T_{\text{пов}}^{\text{вн}} - T_{\text{H}_2\text{O}}), \quad \text{при } r_b < r < r_c, \quad (7)$$

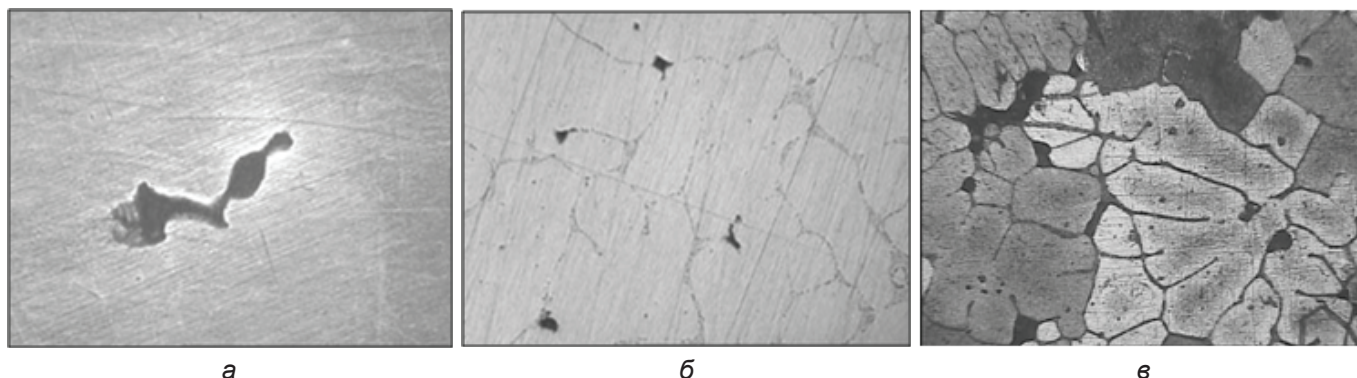


Рис. 3. Микропоры в образце медной отливки, X200 (а, б); X100 (в)

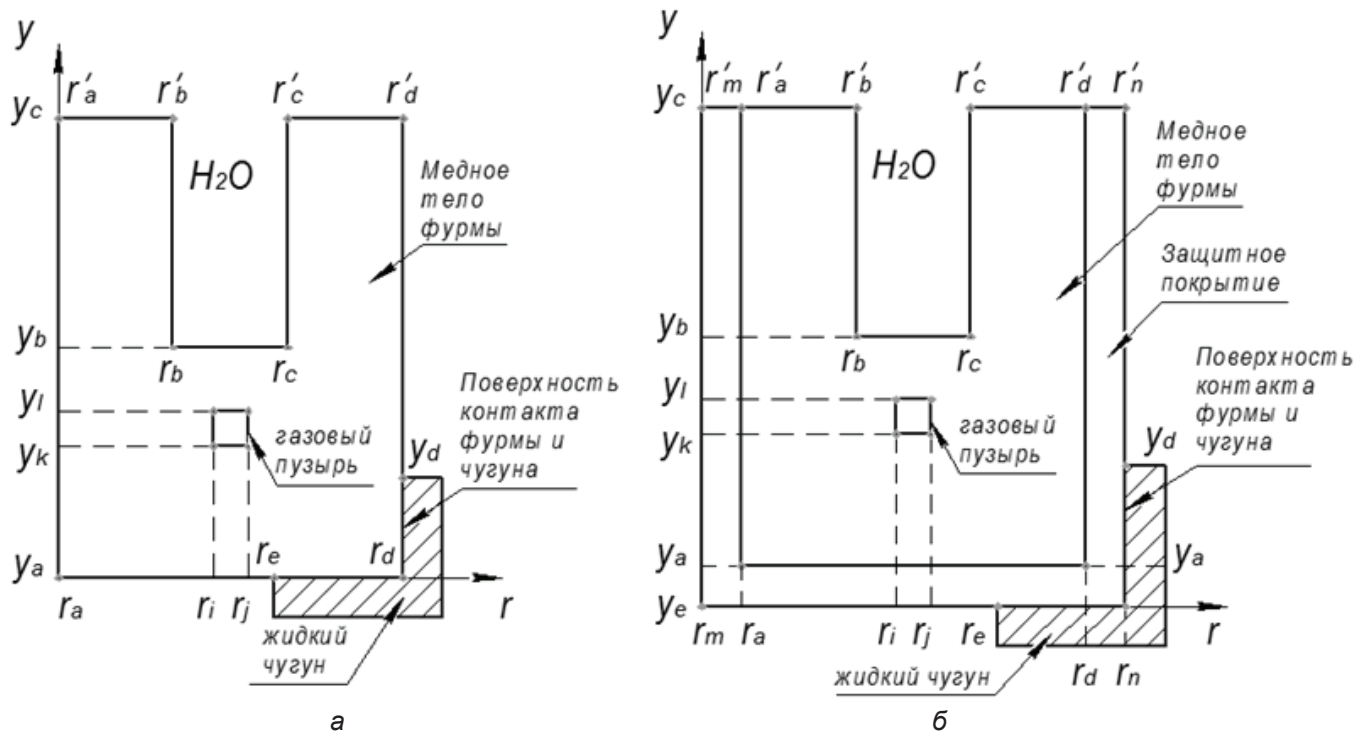


Рис. 4. Расчётная область медной фурмы без защитного покрытия (а) и с защитным покрытием (б)

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_b} = \alpha_{\text{H}_2\text{O}} (T_{\text{пов}}^{\text{вн}} - T_{\text{H}_2\text{O}}), \text{ при } y_b < y \leq y_c, \quad (8)$$

где $\alpha_{\text{H}_2\text{O}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией от внутренней поверхности воздушной фурмы к охлаждающей воде, Вт/(м²·К); $T_{\text{пов}}^{\text{вн}}$ – температура внутренней (водоохлаждаемой) поверхности фурмы, К; $T_{\text{H}_2\text{O}}$ – температура охлаждающей воды, К;
– на тыльной поверхности фурмы

$$T_{\text{пов}1} = f(r), \text{ при } y = y_c, r'_a \leq r \leq r'_b, r'_c \leq r \leq r'_d. \quad (9)$$

Для моделирования влияния подкорковых пузырей на тепловое состояние воздушной фурмы решали систему дифференциальных уравнений, состоящую из уравнений (1) и (10) с начальным условием (2) и соответствующими граничными условиями:

$$c_p \rho' \frac{\partial T'}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda' \frac{\partial T'}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda' \frac{\partial T'}{\partial y} \right),$$

при $r_i < r < r_j, y_k < y < y_l, \quad (10)$

где c_p – теплоёмкость газа в подкорковом пузыре, Дж/(кг·К); ρ' – плотность газа в подкорковом пузыре, кг/м³; λ' – теплопроводность газа в подкорковом пузыре, Вт/(м·К); T' – температура газа в подкорковом пузыре, К; i, j, k, l – индексы, определяющие расположение границ конкретного пузыря в узлах расчётной сетки.

Теплообмен на границе тела фурмы и подкоркового пузыря задавался следующими уравнениями:

– на границе раздела медь – газовый пузырь по радиусу фурмы

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = -\lambda' \frac{\partial T'}{\partial r} \Big|_{r=r_i}, \text{ при } y_k < y < y_l, \quad (11)$$

$$T \Big|_{r=r_i} = T' \Big|_{r=r_i}, \text{ при } y_k < y < y_l, \quad (12)$$

– на границе раздела газовый пузырь – медь по радиусу фурмы

$$-\lambda' \frac{\partial T'}{\partial r} \Big|_{r=r_j} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_j}, \text{ при } y_k < y < y_l, \quad (13)$$

$$T' \Big|_{r=r_j} = T \Big|_{r=r_j}, \text{ при } y_k < y < y_l, \quad (14)$$

– на границе раздела медь – газовый пузырь при движении в направлении оси фурмы

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_k} = -\lambda' \frac{\partial T'}{\partial y} \Big|_{y=y_k}, \text{ при } r_i < r < r_j, \quad (15)$$

$$T \Big|_{y=y_k} = T' \Big|_{y=y_k}, \text{ при } r_i < r < r_j, \quad (16)$$

– на переходе газовый пузырь – медь при движении в направлении оси фурмы

$$-\lambda' \frac{\partial T'}{\partial y} \Big|_{y=y_l} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_l}, \text{ при } r_i < r < r_j, \quad (17)$$

$$T' \Big|_{y=y_l} = T \Big|_{y=y_l}, \text{ при } r_i < r < r_j, \quad (18)$$

Система уравнений (10)-(18) предполагает передачу тепла в пузыре только теплопроводностью, то есть процесс конвективного теплообмена не рассматривается. В пузырях небольших размеров им можно пренебречь.

Тепловое состояние рывальной части воздушной фурмы при контакте части фурмы с расплавленным чугуном можно описать дифференциальным уравнением (1) с начальным условием (2) и следующими граничными условиями:

– на поверхности воздушного канала

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_a} = \alpha_{\Sigma_{\text{воз}}} (T_{\text{воз}} - T_{\text{пов}}), \text{ при } y_a \leq y \leq y_c, \quad (19)$$

– на передней наружной части рывальной поверхности фурмы

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_a} = \alpha_{\Sigma} (T_{\text{ср}} - T_{\text{пов}}), \text{ при } r_a \leq r < r_e, \quad (20)$$

$$T_{\text{пов}} \Big|_{y=y_a} = T_{\text{ч}}, \text{ при } r_e \leq r \leq r_d, \quad (21)$$

где $T_{\text{ч}}$ – температура расплавленного чугуна;

– на боковой поверхности рывальной части фурмы

$$T_{\text{пов}} \Big|_{r=r_d} = T_{\text{ч}}, \text{ при } y_a \leq y \leq y_d, \quad (22)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_d} = -\alpha_{\Sigma} (T_{\text{ср}} - T_{\text{пов}}), \text{ при } y_d < y \leq y_c, \quad (23)$$

– на внутренней поверхности фурмы, охлаждаемой водой, граничные условия соответствуют уравнениям (6)-(8);

– на тыльной поверхности фурмы граничные условия соответствуют уравнению (9);

– граничные условия на движущейся поверхности фазового превращения (плавления части фурмы) задавались следующим образом:

$$T \Big|_{r=r_{\text{ф.п.}}}^{\text{пов. ф.п.}} = T_{\text{м}}, \text{ при } y_a \leq y \leq y_d, \quad (24)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{\text{ф.п.}}} + q_{\text{ф.п.}} \cdot v_{\text{ф.п.}} = -q_0, \text{ при } y_a \leq y \leq y_d, \quad (25)$$

где $T_{\text{м}}$ – температура плавления меди, К; $q_{\text{ф.п.}}$ – удельная теплота плавления меди, Дж/м³; $v_{\text{ф.п.}}$ – скорость перемещения поверхности фазового превращения, м/с; q_0 – абсолютная величина плотности теплового потока, подводимого к поверхности фазового превращения от расплавленного чугуна, Вт/м²;

$$T \Big|_{y=y_{\text{ф.п.}}}^{\text{пов. ф.п.}} = T_{\text{м}}, \text{ при } r_e \leq r \leq r_d, \quad (26)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=y_{\text{ф.п.}}} + q_{\text{ф.п.}} \cdot v_{\text{ф.п.}} = q_0, \text{ при } r_e \leq r \leq r_d, \quad (27)$$

Алгоритм расчёта положения поверхности фазового превращения в процессе плавления части фурмы аналогичен описанному в [4].

Для моделирования влияния защитного покрытия на тепловое состояние воздушной фурмы решали систему дифференциальных уравнений, состоящую из уравнения (28), которое описывает тепловое состояние медной части фурмы и уравнения (29), ко-

торое описывает тепловое состояние защитного покрытия фурмы с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right),$$

$$r_a \leq r \leq r_d \text{ при } y_a \leq y \leq y_c, \quad (28)$$

$$c_p'' \rho'' \frac{\partial T''}{\partial \tau} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda'' \frac{\partial T''}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda'' \frac{\partial T''}{\partial y} \right),$$

$$r_m < r \leq r_a \text{ при } y_e \leq y \leq y_c,$$

$$r_a < r < r_d \text{ при } y_e < y \leq y_a,$$

$$r_d \leq r < r_n \text{ при } y_e \leq y \leq y_c, \quad (29)$$

где c_p'' – теплоёмкость защитного покрытия, Дж/(кг·К); ρ'' – плотность защитного покрытия, кг/м³; λ'' – теплопроводность защитного покрытия, Вт/(м·К).

Начальные условия

$$T(r, y, \tau) = T_{\text{нач}},$$

$$\text{при } r_m \leq r \leq r_n, \quad y_e \leq y \leq y_c, \quad \tau = 0. \quad (30)$$

Граничные условия

– на поверхности защитного слоя в воздушном канале фурмы

$$-\lambda'' \frac{\partial T''}{\partial r} \Big|_{r=r_m} = \alpha_{\Sigma_{\text{воз}}} (T_{\text{воз}} - T''_{\text{пов}}),$$

$$\text{при } y_e \leq y \leq y_c, \quad (31)$$

– на поверхности защитного слоя на передней рывальной части фурмы

$$-\lambda'' \frac{\partial T''}{\partial y} \Big|_{y=y_e} = \alpha_{\Sigma} (T_{\text{ср}} - T''_{\text{пов}}),$$

$$\text{при } r_m \leq r \leq r_n, \quad (32)$$

– на поверхности защитного слоя на наружной поверхности фурмы

$$-\lambda'' \frac{\partial T''}{\partial r} \Big|_{r=r_n} = -\alpha_{\Sigma} (T_{\text{ср}} - T''_{\text{пов}}),$$

$$\text{при } y_e \leq y \leq y_c. \quad (33)$$

Теплообмен на границе контакта защитного покрытия и тела фурмы описываются граничными условиями IV рода.

Для аппроксимации дифференциальных уравнений конечными разностями использовался интегрирующий метод, четырёхточечный шаблон и неявная схема.

На основании математических моделей теплового состояния фурм разработан пакет прикладных программ, и выполнены расчёты для различных режимов эксплуатации воздушных фурм.

Исходные данные были использованы, из фактических замеров АСУ ТП параметров работы фурмы и доменной печи в целом, которые снимаются с датчиков оборудования печи и хранятся в пакете специализированной программы контроля и управления доменной плавкой.

Результаты решения систем уравнений приведены на рис. 5-7. На рис. 5 (кривая 1) показано распределение температур в сечении медной отливки без структурных дефектов, перепад температур по сечению отливки составляет 140 °С при температуре внутренней водоохлаждаемой поверхности рыльца около 120 °С. Установленная скорость потока охлаждающей жидкости и расхода воды достаточна для эффективного теплосъёма с внутренней поверхности рыльца. На рис. 5 также показано влияние одного газового пузыря Ø 3 мм, расположенного в сечении отливки медного рыльца (кривая 2) и двух газовых пузырей Ø 7 и 4 мм, расположенных последовательно один за другим в направлении теплоотвода в сечении отливки медного рыльца (кривая 3) на распределение температуры в этом сечении. Расчётная температура за одним газовым пузырьём по направлению к наружной части фурмы повышается приблизительно на 480 °С. Температура за двумя газовыми пузырями по направлению к наружной части фурмы, согласно расчётам, повышается на 520 °С. Увеличение дефектов структуры приводит к повышению температуры поверхности рыльной части фурмы. При обычных режимах работы фурмы газовые пузыри не приводят к аварийному перегреву поверхности рыльной части фурмы, но они могут оказать влияние на снижение теплосъёма при повышении температуры в прифурменной зоне и при капельном стекании на рыльце фурмы жидкого чугуна. В этом случае на поверхности фурмы может происходить локальное оплавление медной поверхности.

При непосредственном контакте медной поверхности рыльца фурмы с жидким чугуном температура поверхности рыльца мгновенно нагревается до ~1460 °С. При этом температура внутренней поверхности отливки рыльца повышается до 240 °С при условии интенсивного теплосъёма с внутренней стороны фурмы. Однако при этом тело фурмы от поверхности до глубины около 20 % разогрето выше температуры плавления меди (рис. 6, кривая 1), что приводит к оплавлению поверхности на данную глубину. И при условии дальнейшего контакта

фурмы с расплавленным чугуном процесс разогрева и последующего оплавления фурмы происходит до прогара фурмы в зоне контакта. При этом по мере утончения тела фурмы температура на внутренней водоохлаждаемой поверхности фурмы повышается до появления пузырькового и затем плёночного кипения воды, что дополнительно снижает теплоотвод и увеличивает скорость прогара фурмы. При контакте жидкого чугуна с медным рыльцем фурмы, в структуре которого имеются дефекты в виде газовых пузырей, происходит более интенсивный перегрев тела фурмы до температур существенно превышающих температуру плавления меди, в результате чего оплавление и прогар фурмы происходит практически мгновенно (рис. 6, кривая 2, 3).

Для исключения непосредственного контакта между поверхностью медного рыльца и расплавленным чугуном или раскалённым коксом используют защитные покрытия рыльной части фурмы из жаростойких

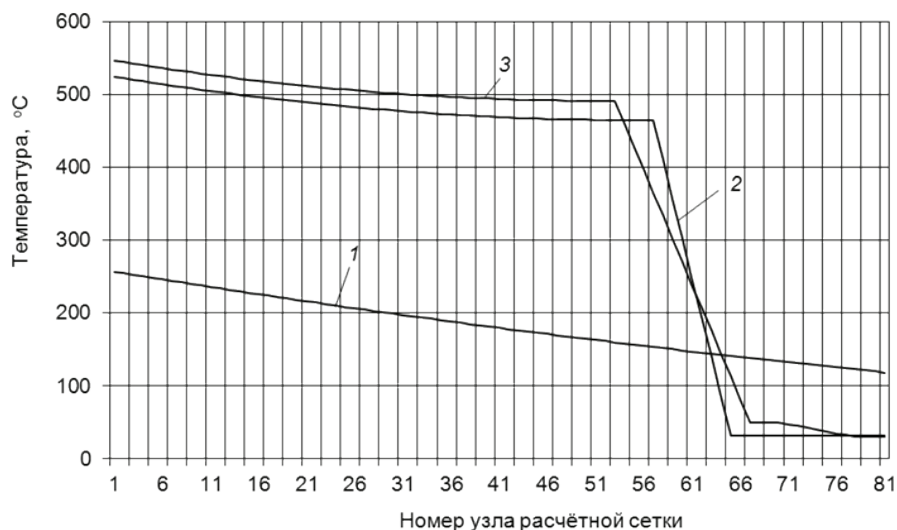


Рис. 5. Распределение температуры в теле фурмы: 1 – в чистой меди без дефектов, 2 – в меди с одним газовым пузырьём, 3 – в меди с двумя газовыми пузырями

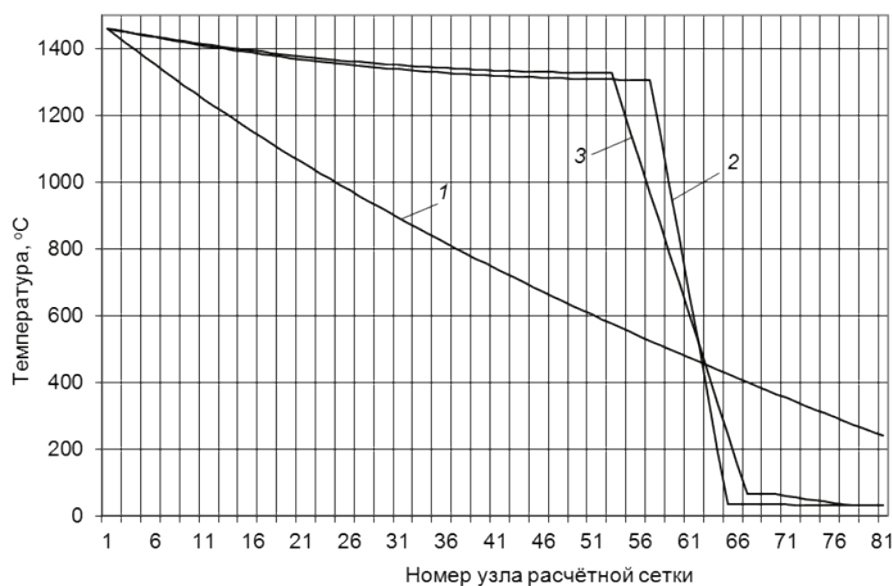


Рис. 6. Распределение температуры в теле фурмы при контакте: 1 – в чистой меди с жидким чугуном, 2 – с чугуном и одним газовым пузырьём, 3 – с чугуном и двумя газовыми пузырями

и огнеупорных материалов. По результатам исследований автором [5] предложен защитный слой, состоящий из переходного и диффузионного слоёв толщиной 1,5-3,5 мм с содержанием алюминия до 14 % по массе и слоя оксида алюминия, сформированного газопламенным напылением на медь с последующим диффузионным отжигом. В результате на поверхности фурм образуется двухслойное Al/Al_2O_3 покрытие, превышающее стойкость фурм с алюминиевым покрытием на 80 % и снижающее тепловые потери через поверхность фурм на 3,9 %. Однако указанные покрытия не обеспечивают надёжную защиту фурм от прогара.

В качестве возможного решения задачи защиты выступающей части рыльца фурмы в прифурменной зоне от прогара рассмотрен огнеупорный материал ZrO_2 , обладающий высокой огнеупорностью, достаточной механической прочностью и низкой теплопроводностью.

Рассчитанное распределение температур в фурме с защитным покрытием показывает, что в защитном слое толщиной 1,5 и 5,0 мм при стационарном режиме работы фурмы (рис. 7, кривые 1 и 2 соответственно). А также при непосредственном кратковременном контакте защитного слоя рыльца с расплавом чугуна или раскалённым коксом с температурой 1460 °С (рис. 7, кривые 3 и 4) происходит основное снижение температуры в защитном слое и поток охлаждающей воды внутри фурмы эффективно справляется с теплосъёмом в рыльце. Причём при толщине покрытия 1,5 мм и штатном режиме работы поверхность покрытия разогревается приблизительно до 1100 °С, а при толщине покрытия 5,0 мм в штатном режиме работы температура поверхности защитного покрытия составляет около 1550 °С. Применение защитных жаростойких материалов для покрытия наружной поверхности рыльца фурмы должно обеспечивать достаточные механические и эффективные теплотехнические характеристики защитного слоя в температурном интервале прифурменной зоны и прочное механическое сцепление с основным телом медного рыльца.

На основании вышеизложенного – наиболее частой причиной прогара воздушных фурм является нарушение хода доменной печи, в результате чего возможен контакт фурмы с жидким чугуном или разогретыми твёрдыми компонентами шихты.

Наличие литейных дефектов в медной отливке рыльца фурмы (поры, газовые пузыри, раковины)

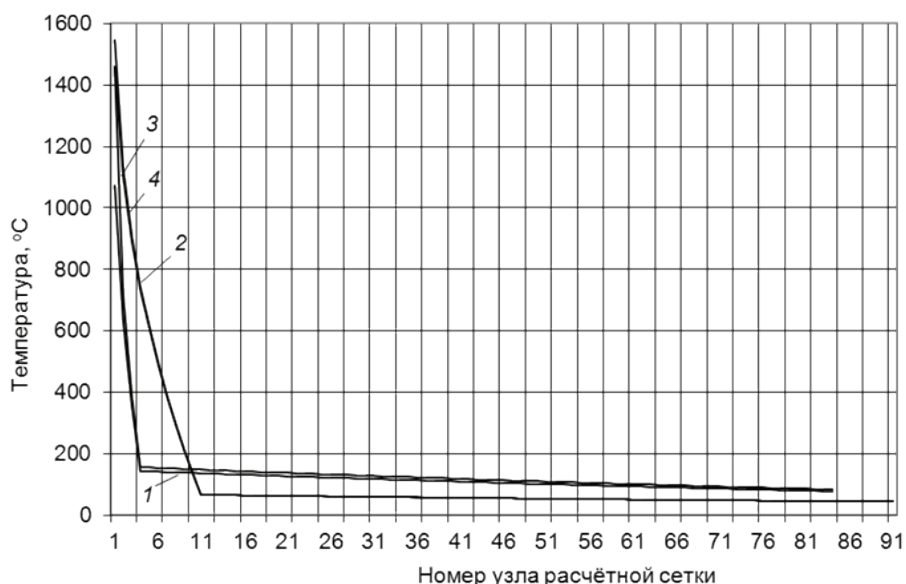
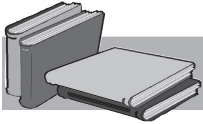


Рис. 7. Распределение температуры в теле фурмы с защитным покрытием толщиной: 1,5 мм (1), 5 мм (2) – без контакта с чугуном; 1,5 мм (3) и 5 мм (4) – при контакте с чугуном

затрудняют теплоотвод и могут стать причиной локального перегрева и дальнейшего прогара отливки. Для устранения литейных дефектов необходимо исключить возможность загазованности расплава при его выплавке, разливке и кристаллизации, соблюдать температурный и скоростной режимы выплавки и разливки медного расплава, а также обеспечить регламентированный отвод тепла при кристаллизации и охлаждении расплава, повысить податливость стержневой массы при значительных усадках меди в процессе охлаждения отливки.

Разработанная математическая модель позволяет спрогнозировать тепловое состояние фурмы при различных режимах её эксплуатации и наличии дефектов структуры, снизить затраты на дорогостоящие мероприятия и эксперименты, направленные на повышение стойкости воздушных фурм доменных печей. Адекватность разработанной математической модели тепловой работы фурмы её эксплуатационным параметрам в части применения медного рыльца без защитного покрытия подтверждается как фактическими изменениями параметров работы фурмы и печи в целом, так и характером прогара фурмы после её извлечения и обработки действовавших в этот период показаний датчиков по печи.

Предлагаемая математическая модель теплового состояния фурмы позволяет рассчитывать без проведения дорогостоящих натурных экспериментов использование различных материалов в качестве защитных покрытий рыльца фурмы с целью увеличения срока его эксплуатации и снижения вероятности прогара.



ЛИТЕРАТУРА

1. Донсков Д. Е. Анализ факторов и механизм горения воздушных фурм доменных печей / Д. Е. Донсков // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2005. – № 10. – С. 6-9.
2. Чельцов Я. Ф. О механизме разрушения фурм доменных печей / Я. Ф. Чельцов // *Сталь*. – 1970. – № 2. – С. 112.
3. Ефименко Г. Г. *Металлургия чугуна* / Г. Г. Ефименко, А. А. Гиммельфарб, В. Е. Левченко. – Киев: Высш. школа, 1981. – 495 с.
4. Арутюнов В. А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей: Учебник для вузов / В. А. Арутюнов, В. В. Бухмиров, С. А. Крупенников – М.: *Металлургия*, 1990. – 239 с.
5. Акимов В. А. Исследование и совершенствование технологии изготовления воздушных фурм доменных печей нанесением алюмосодержащих газопламенных покрытий с последующей термообработкой // автореферат дис. канд. тех. наук / В. А. Акимов. – Москва, 2011. – 23 с.

Анотація

Биковських П. С., Тищенко В. А., Биковських С. В.

Математична модель теплової роботи повітряної фурми доменної печі

Розроблено математичну модель теплового стану фурми доменної печі, яка дозволяє розрахувати температурне поле тіла фурми, що працює в нормальному режимі експлуатації, за наявності дефектів структури, при використанні захисних покриттів, а також при контакті фурми з рідким чавуном.

Ключові слова

математична модель, повітряна фурма, доменна піч, дефекти структури, захисне покриття, інтегро-інтерполяційний метод, диференціальне рівняння

Summary

Bykovskykh P., Tischenko V., Bykovskykh S.

Mathematical model of thermal performance of blast furnaces blower nozzle

There has been developed a mathematical model for thermal condition of blast furnaces blower nozzle which allows calculating the temperature pattern of the nozzle body under the normal mode of operation, in the presence of structural defects, by using protective coatings, as well as by nozzle contacting liquid iron.

Keywords

mathematical model, blower nozzle, blast furnaces, structural defects, protective coating, the integrational-interpolation method, differential equation

Поступила 11.03.2015