

УДК 621.783.536.24

М.П. Ревун, Ю.Н. Каюков, В.И. Иванов, А.И. Чепрасов

Запорожская государственная инженерная академия

К РАСЧЕТУ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА ПЕЧЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В КАМЕРНОМ РЕЖИМЕ

При проектировании новых и реконструкции действующих газовых печей основной задачей является обеспечение достаточно высокой равномерности нагрева металла в момент его выдачи из рабочего пространства. Наиболее сложно решать такую задачу для пламенных печей, работающих в камерном режиме [1], когда сжигание топлива способствует формированию неравномерного распределения температуры в газовом объеме камеры и, как следствие, неравномерности подвода теплоты к поверхности нагреваемого металла.

На ряде металлургических предприятий заготовки перед ковкой подвергают нагреву в двухкамерных газовых печах конструкции института Стальпроект. Эти печи отапливаются при помощи восьми горелок, установленных в два ряда по высоте боковой стенки камеры. Наличие верхней и нижней зон отопления печи обеспечивает двухсторонний подвод теплоты к заготовкам, расположенным на подовых брусках, однако одностороннее боковое отопление при факельном сжигании топлива препятствует достижению равномерного нагрева металла, расположенного в направлении движения греющей среды.

Для оценки равномерности нагрева металла при различных режимах отопления печей такого типа разработана расчетная модель, основанная на решении сопряженной задачи внешнего и внутреннего теплообмена в дискретном времени.

При решении задачи внешнего теплообмена с использованием зонального метода [2] принимаются следующие допущения. Стальные заготовки прямоугольного сечения, укладываемые в один слой без зазоров, представляются в виде пластины. Наличие верхней и нижней зон отопления обеспечивает симметричный нагрев заготовок в печи. Тела, участвующие в лучистом теплообмене (металл, кладка, продукты сгорания) являются серыми, а излучение и отражение лучистой энергии поверхностями металла и кладки – диффузными.

Постановка задачи предусматривает зональную модель внешнего теплообмена в рабочем объеме пламенной печи, работающей в камерном режиме. Замкнутая система образована твердыми непрозрачными телами, разделенными поглощающе-излучающей средой. Для учета изменения состава продуктов сгорания и оптических свойств среды в направлении развития факела система (см. рисунок) разделена на 27 зон: пять объемных

зон факела и продуктов сгорания (1 – 5), пять плоских поверхностных зон металла (6 – 10) и семнадцать плоских поверхностных зон кладки (11 – 27).

Длину факела, концентрацию топлива, степень его сгорания, подсосы воздуха в зону горения, а также концентрацию излучающих компонентов продуктов сгорания по длине факела рассчитывали с использованием рекомендаций работы [3].

В пределах каждой поверхностной зоны абсолютную температуру газовой среды, концентрацию ее поглощающе-излучающих компонентов (CO_2 , H_2O), а также степень черноты в пределах каждой объемной зоны принимали постоянными. Объемное излучение газовой среды заменяли эквивалентным диффузным излучением воображаемой поверхности, имеющей степень черноты, равную степени черноты объемной зоны. Кроме того, вводили условные абсолютно черные поверхности, которые отделяют i -ую объемную зону от смежных j -ых объемных зон, что позволяет представить зональную модель теплообмена в виде отдельных подсистем.

Взаимодействие смежных подсистем осуществляется через соответствующие условные поверхности, имеющие температуру, при которой плотность потоков результирующего излучения на границах подсистемы сохраняет свое действительное значение. Определение этой температуры производят путем расчета радиационного теплообмена в отдельных подсистемах и согласования их величин на границах смежных подсистем по зависимости

$$q_{j,i} = -q_{i,j} = \sigma_0 [T_{j,i}^4 - T_{i,j}^4], \quad (1)$$

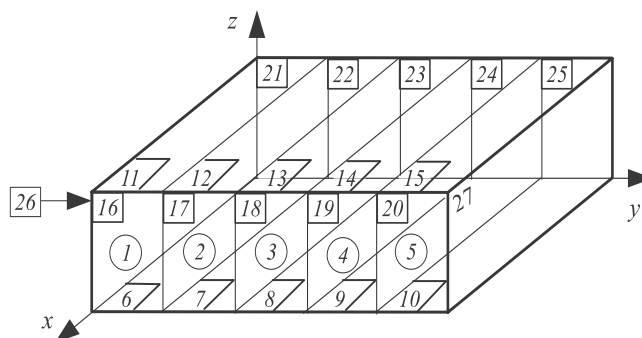


Схема зональной модели теплообмена в рабочей камере газовой нагревательной печи

где $q_{i,j}$ – плотность потока результирующего излучения, проходящего через условную поверхность, отделяющую j -ую объемную зону от смежной i -ой объемной зоны; $T_{j,i}$ и $T_{i,j}$ – температуры условных поверхностей, отделяющих соответственно i -ую объемную зону от смежной j -ой объемной зоны и j -ую объемную зону от смежной i -ой объемной зоны; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана.

Расчет радиационного теплообмена в пределах отдельной подсистемы осуществляют с использованием резольвентного зонального метода. Система уравнений содержит

– зональное уравнение для объемной зоны

$$\sum_{k=1}^n a_{k,i} T_k^4 + g_i T_i + g_i^0 + Q_i^v = 0, \quad i = n; \quad (2)$$

– зональные уравнения для поверхностных зон

$$Q_i = \sum_{k=1}^n a_{k,i} T_k^4, \quad i = 1, \dots, n-1, \quad (3)$$

где Q – результирующий тепловой поток; T – зональная температура; g_i – коэффициент конвективного теплообмена для объемной зоны i -ой подсистемы; g_i^0 – сумма слагаемых, не зависящих от температуры объемной зоны; Q_i^v – выделение теплоты в объемной зоне.

При известных значениях температуры поверхностных зон и выделения теплоты в объемных зонах решение системы зональных уравнений (2), (3) совместно с уравнением (1) позволяет определять на каждом временном шаге температуру объемных зон и результирующие тепловые потоки для поверхностных зон.

Поверхностные зоны модели являются границами, отделяющими объемные газовые зоны от объемных зон металла и кладки. Постоянство величин, характеризующих теплообмен в пределах каждой расчетной поверхностной зоны, позволяет описать нагрев объемных зон металла и кладки, представленных в виде бесконечных одно- и двухслойных пластин, одномерным дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности в декартовых координатах и соответствующими краевыми условиями.

Решение задачи внутреннего теплообмена выполнено методом конечных разностей по неявной четырехточечной схеме, при этом на каждом временном шаге осуществлено определение дискретных полей температуры объемных зон металла и кладки, а также температуры соответствующих им поверхностных зон.

Оценка результатов численного исследования теплообмена позволила установить, что достижение высокой равномерности нагрева металла можно обеспечить при сжигании топлива с получением удлиненных факелов, но не превышающих размеры рабочей камеры печи, хотя при этом наблюдается некоторое (не более 3 %) снижение уровня теплоотдачи.

Одним из направлений повышения качества нагрева металла в печах камерного типа является импульсная подача топлива в период выдержки [4]. Для выбранной длины несветящегося факела природного газа $L_n = l_n/B = 5$ (где l_n и B – длина пути подсоса факела и геометрический размер рабочей камеры печи в направлении развития факела) произведена сравнительная оценка качества нагрева металла при импульсном (циклической подаче топлива в период выдержки печи) и типовом (непрерывном изменении расхода топлива в период выдержки) режимам. Для сопоставимости результатов нагрева в обоих случаях принимали длительность периода выдержки 3 ч. Качество нагрева металла по зонам печи оценивали по перепаду температуры (Δt_n) на поверхности металла (разности между показанием термоэлектрического термометра и температурой поверхности металла t_n), а также перепаду температуры $\Delta t_{ц}$ между поверхностью (t_n) и тепловым центром заготовки ($t_{ц}$). Температуры газа (t_r), поверхности t_n и теплового центра ($t_{ц}$) нагреваемого металла отвечают номерам соответствующих им объемных зон. Результаты расчета температуры по зонам печи в момент завершения нагрева металла при типовом (числитель) и импульсном (знаменатель) режимах нагрева приведены ниже:

Параметр	Значение параметра в объемной зоне				
	1	2	3	4	5
$t_r, ^\circ\text{C}$	<u>1119</u>	<u>1233</u>	<u>1183</u>	<u>1155</u>	<u>1145</u>
	1109	1218	1197	1169	1155
$t_n, ^\circ\text{C}$	<u>1145</u>	<u>1163</u>	<u>1157</u>	<u>1147</u>	<u>1140</u>
	1146	1162	1163	1155	1148
$t_{ц}, ^\circ\text{C}$	<u>1135</u>	<u>1157</u>	<u>1153</u>	<u>1141</u>	<u>1131</u>
	1137	1158	1159	1148	1139
$\Delta t_n, ^\circ\text{C}$	<u>14,87</u>	<u>-2,74</u>	<u>2,55</u>	<u>12,93</u>	<u>20,35</u>
	13,80	-2,45	-2,88	5,22	12,30
$\Delta t_{ц}, ^\circ\text{C}$	<u>10,32</u>	<u>5,44</u>	<u>4,46</u>	<u>6,91</u>	<u>10,84</u>
	9,69	4,54	4,28	6,82	9,06

При импульсном режиме отопления в отличие от типового режима обеспечивается циклическое изменение длины факела от максимального до допустимо минимального значения, что позволяет использовать преимущества длинного факела в период выдержки печи. Наличие пульсирующего факела способствует снижению неравномерного распределения температуры газовой среды по зонам печи, а следовательно, улучшению равномерности распределения тепловых потоков на поверхности нагреваемого металла.

Применение импульсного отопления позволяет повысить температуру в последней по ходу факела объемной газовой зоне, что, несмотря на некоторое увеличение потерь теплоты с отходящими продуктами сгорания, сопровождается ростом теплосодержания металла в этой зоне. Кроме того, при импульсном режиме отопле-

ния по сравнению с типовым режимом зафиксировано улучшение равномерности нагрева заготовок по перепаду температуры на поверхности металла для последней по ходу движения факела зоны.

Выводы. С использованием разработанной расчетной модели выполнено численное исследование теплообмена в печи камерного типа. Для достижения высокого качества нагрева металла наиболее предпочтительной является система отопления, обеспечивающая сжигание топлива в предельно длинных факелах. Сравнительная оценка качества нагрева металла, получаемого с использованием типового и импульсного режимов, показала преимущества импульсного режима нагрева.

УДК 669.1.053.1

**М.Ю. Проценко, С.В. Куберский,
С.Б. Эссельбах, С.В. Семирягин**

Донбасский государственный технический университет

АНАЛИЗ РАСХОДОВАНИЯ ТОКОПОДВОДЯЩИХ ЭЛЕКТРОДОВ ДЛЯ ПРОЦЕССА ДУГОВОГО ГЛУБИННОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

Внепечная обработка чугуна и стали является важным технологическим звеном в производстве основных видов металлопродукции. Обеспечение высокого качества металла в значительной степени зависит от процессов рафинирования, раскисления и легирования, для реализации которых используются различные технологии, оборудование и материалы. Наибольшее распространение в настоящее время получили обработка металла лигатурами, порошковой проволокой и шлаковыми смесями. Одним из основных недостатков существующих технологий рафинирования и легирования металла является высокая стоимость используемых материалов, обусловленная значительными материальными и энергетическими затратами на этапе их производства.

Одним из перспективных направлений внепечной обработки расплавов на современном этапе является метод дугового глубинного восстановления (ДГВ) [1]. Сущность этого метода заключается в восстановлении полезных элементов из вторичного сырья и отходов производства в зоне низкотемпературной плазмы дугового разряда с использованием недефицитных восстановителей. Этот метод позволяет исключить из металлургического цикла достаточно затратное производство ферросплавов, поэтому усовершенствование предлагаемой технологии и широкое внедрение ее на предприятиях отрасли являются весьма актуальными задачами.

Расходуемыми элементами ДГВ являются дуговые блоки [1]. В центре дугового блока расположен токо-

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губинский В.И. – В кн.: Металлургическая теплотехника. Сб. научных трудов Национальной металлургической академии Украины. В 2-х т. Т. 1. – Днепропетровск: Пороги, 2005. С. 149 – 155.
2. Арутюнов В.И., Бухмиров В.В., Крупенников С.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
3. Лисиенко В.Г. Интенсификация теплообмена в пламенных печах. – М.: Металлургия, 1979. – 224 с.
4. Ревун М.П., Гранковский В.И., Байбуз А.Н. Интенсификация работы нагревательных печей. – Киев: Техника, 1989. – 136 с.

© 2012 г. М.П. Ревун, Ю.Н. Каюков,
В.И. Иванов, А.И. Чепрасов
Поступила 5 апреля 2011 г.

подводящий электрод, к которому (как к основному конструктивному элементу блока) предъявляется ряд технологических требований, рассмотренных подробно в работе [2]. В этой работе изучены и свойства дуговых блоков для ДГВ магния при десульфурации чугуна. Требования к блокам и электродам для ДГВ других элементов необходимо устанавливать путем дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Целью настоящей работы являются изучение влияния технологических параметров процесса дугового глубинного восстановления элементов из марганецсодержащих ферросплавных отходов и изучение влияния состава токоподводящих электродов на скорость их расходования.

Скорость расходования восстановительного блока является важнейшим показателем процесса ДГВ, который должен быть прогнозируемым и регулируемым. Этот параметр зависит от теплового потока с дугового разряда на поверхность каверны, образующейся в торцевой части блока. Регулированию подлежит процесс подвода тепла в каверну.

Важным является согласование скоростей расходования всех конструктивных элементов блока: рудной части, токоведущих электродов и электроизоляционной оболочки блока. Решение этой задачи возможно путем изменения геометрических размеров (диаметра) конструктивных элементов блока и их состава. Состав рудной части определен стехиометрией реакций вос-