

А.Б. Бирюков /д.т.н./, П.А. Гнигитёв /к.т.н./, В.А. Шатович
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОТЫ ГАЗОВ, ОТХОДЯЩИХ ИЗ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ, С ЦЕЛЬЮ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА МЕТАЛЛОЛОМА

Рассмотрены возможные способы утилизации теплоты отходящих газов при выплавке стали в дуговых сталеплавильных печах. Основное внимание сконцентрировано на предварительном нагреве металлолома перед подачей в дуговую сталеплавильную печь. Отмечено отсутствие общеизвестных методик расчета таких процессов. Разработана методика для расчета процесса нагрева металлического лома в системе Consteel, предполагающей непрерывную подачу металлолома в дуговую сталеплавильную печь при помощи конвейера, на котором поток металла предварительно нагревается потоком отходящих газов, движущихся во встречном направлении. В разработанной методике учтено, что в разные периоды работы печи температура отходящих газов существенно изменяется. Разработанная методика позволит на стадии проектирования дуговых сталеплавильных печей выбрать рациональную мощность печного трансформатора и сводовых горелок с учетом теплового потока, возвращаемого в печь с подогретым металлоломом.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, отходящие газы, система Consteel, подогрев металлолома, рекуперация теплоты.

Постановка проблемы

Принцип работы дуговой электропечи основан на создании электрической дуги между графитовыми электродами и металлоломом. Достоинство дуговой сталеплавильной печи (ДСП) состоит в выплавке высококачественных легированных и высоколегированных сталей с низким содержанием серы, фосфора, кислорода и других нежелательных и вредных примесей.

Недостатками выступают тепловые потери: тепло, уносимое отходящими газами (20...30 %), и потери тепла при открытом своде через рабочее окно (10...20 %) [1,2].

В ДСП за счет высокого напряжения на электродах, создающих дугу в рабочем пространстве печи, достигается высокая температура – до 2500 °С [3]. Для ДСП энергия отходящих газов составляет в общем балансе до 45 %, а их температура на разных этапах процесса плавки равна 600...1600 °С. Основными составляющими отходящих газов ДСП являются диоксид углерода (CO₂), монооксид углерода (CO), азот (N₂), кислород (O₂) и пары воды (H₂O).

Покидающие рабочее пространство металлургических агрегатов горячие дымовые газы уносят с собой значительное количество теплоты отходящих газов (тем большее, чем выше температура газов и чем ниже степень использования тепла в агрегате).

Анализ последних исследований и публикаций

Для максимальной утилизации теплоты чаще всего используют следующие варианты: пропускают отходящие горячие газы через котел-утилизатор с целью получения пара; используют горячие газы для предварительного (перед загрузкой в сталеплавильный агрегат) подогрева металлолома; организуют передачу тепла горячих газов воздуху или газу, подаваемому в металлургический агрегат для горения (применение теплообменников регенеративного и рекуперативного типов). Следует подчеркнуть, что единица тепла, отобранного у горячих дымовых газов и вносимого в печь подогретым воздухом или газом, оказывается значительно ценнее единицы тепла, полученной в печи в результате сгорания топлива.

Одним из типичных подходов использования теплоты вторичных газов в металлургической теплотехнике является подогрев воздуха в рекуператоре. При нагреве воздуха до 200...300 °С достигается экономия 15...20 % топлива. Подогрев воздуха до 400...500 °С в отдельно стоящем рекуператоре за счет глубокой утилизации теплоты отходящих газов, отбираемых в верхней части печи и сжигаемых в специальной топке после сухой очистки, позволяет снизить расход топлива на 30...40 % [3]. Использование регенеративных и рекуперативных теплообменников обеспечива-

ет заметное снижение расхода топлива. Регенеративные теплообменники широко применяют на высокотемпературных печах, так как регенераторы могут работать при весьма высоких температурах дымовых газов (1500...1600 °С). При такой температуре рекуператоры работают устойчиво пока не могут [4].

В настоящее время основное внимание ученых и производственников, работающих в данной области, сосредоточено на предварительном нагреве шихтовых материалов удаляемыми из рабочего пространства газами.

Наиболее простым способом решения этой задачи является нагрев шихты в загрузочных бадьях (корзинах). Этот способ является малозатратным и универсальным, а также пригодным не только для новых цехов, но и для действующих, для всех типов электропечей. При этом не требуются изменения в технологии и организации производства.

Предлагаемое устройство обеспечивает возможность нагрева шихты, предназначенной для загрузки в плавильную печь. Надежные уплотнители на входе горячих газов в загрузочную бадью должны обеспечить проход газов только через слой лома и предотвратить обходное их движение по стенам камеры нагрева. Для улучшения прохода дымовых газов и удаления собирающихся на дне масел и других жидких продуктов, образующихся при нагреве лома, бадьи в нижней части имеют отверстия. Установки оснащены средствами измерения и контроля параметров газа. Регулирование расхода дымовых газов осуществляется автоматически в зависимости от их температуры на выходе из камеры нагрева. Установки оснащены регулирующими и отсечными клапанами, работающими в условиях запыленных газов при температуре до 800...850 °С [1].

Благодаря установке цилиндрической вставки обеспечивается допустимый полезный объем бадьи и образование кольцевого зазора между вставкой и корпусом бадьи для теплоизоляционного материала. В результате обеспечивается возможность высокотемпературного нагрева шихты, сокращение удельных затрат и повышение качества выплавляемой стали.

Нагревают лом обычно до среднемассовой температуры 250...350 °С за 15...20 мин (емкость загрузочной корзины 6 т) при температуре газа на входе 400...800 °С [5].

Главный недостаток данного устройства (в случае неиспользования вставки) состоит в том, что невозможно нагреть шихту, не нагревая корпус бадьи. Температура нагрева бадьи выше, чем у шихты. Соппротивление вдоль корпуса бадьи

для потока газов меньше, чем в центральной части слоя. Нагрев корпуса бадьи выше температуры 250...350 °С опасен и противоречит требованиям техники безопасности для грузонесущего оборудования [5].

Система Consteel явилась альтернативной технологией, удовлетворяющей современным требованиям, с которыми столкнулись металлургии во всем мире.

В технологической линии Consteel скрап с помощью кранов загружают на горизонтальный импульсный транспортер, обеспечивающий непрерывную подачу металлолома в ДСП [6...8], который предварительно нагревается потоком отходящих газов, движущихся во встречном направлении (при движении в противотоке достигается высокая степень использования теплоты). В ходе непрерывной загрузки ванна с жидким металлом в ДСП защищена слоем вспененного шлака, и ее температура и удельный расход энергии контролируется. Скрап, поступающий в печь, погружается в жидкий металл (оставшийся от предыдущей плавки), который всегда имеет достаточный объем. Электрическая дуга находится под слоем вспененного шлака. Таким образом, процесс плавки становится фактически непрерывным. При этом обеспечивается постоянное плоское зеркало металла, над которым горят электроды, а расплавление поступающего металлолома происходит в ванне жидкого металла, что приводит к повышению стабильности процесса [9].

Энергия передается ванне с жидким металлом и шлаку с большей эффективностью, при этом уменьшается излучение в направлении стеновых панелей и огнеупоров. Так как ванна с расплавленным металлом покрыта вспененным шлаком на протяжении всего периода работы печи под током, электрическая дуга работает в более стабильных условиях, чем в случаях, когда она горит в атмосфере и при работе с более высоким коэффициентом мощности, то есть при максимизации активной мощности по отношению к реактивной [6].

В процессе Consteel не предъявляется особых требований к металлосодержащей шихте [10]. Потребитель может приобретать скрап низкой плотности, так как отсутствуют ограничения по объему, присущие загрузке коробами. Другим важным и подтвержденным преимуществом является повышенный выход годного, достигаемый в результате более эффективного равновесия металлургических реакций в расплавленном металле благодаря снижению образований FeO. В результате значительно уменьшается стоимость металлошихты. Непрерывная загрузка

обеспечивает высокую гибкость процесса, позволяя использовать железо прямого восстановления, горячеприкатированное железо, жидкий и чушковый чугун [9].

Равномерный процесс плавки в ванне печи оказывает меньшее воздействие на такое оборудование, как водоохлаждаемые стеновые панели, крышка, водоохлаждаемые фурмы, а также завалочные краны, которые уже не используются, за исключением редких случаев завалки коробами, например, в начале кампании печи. Кроме того, сокращаются объемы ремонтов футеровки и горелок. Новейшие системы Consteel спроектированы с высокой надежностью, высоким уровнем работоспособности (более 99 %), требуют небольшого и несложного ремонтного обслуживания [11].

Предварительный нагрев скрапа в общем случае производится как за счет использования физической теплоты отходящих газов, так и за счет тепловыделения по реакции горения CO. Причем дожигание CO, как правило, частично производится в ДСП, а частично – в туннельном нагревателе. Для обеспечения дожигания CO внутри секции конвейера требуется обеспечение необходимой концентрации кислорода, что достигается путем добавления требуемого объема свежего воздуха.

Основным преимуществом процесса Consteel является не только утилизация теплоты высокотемпературных отходящих газов, но и экономия электроэнергии [10], достигаемая благодаря действию следующих факторов: предварительному нагреву скрапа и отсутствию необходимости открывать крышку печи для загрузки скрапа; меньшей установленной мощности (на 20...30 %) трансформатора печи [12]; меньшему на 30 % выделению пыли в процессе плавки и меньшему шумовому воздействию на окружающую среду (менее 95 дБ) по сравнению с традиционными технологиями (до 120 дБ) [10].

В первых публикациях, относящихся ко времени появления процесса Consteel, отапливаемого отходящими газами ДСП, фигурировали значения температуры нагрева лома порядка 600...800 °C [13]. В настоящее время для проектирования и расчетов принимают значение 300 °C. Однако и эту температуру считают несколько завышенной [14].

Основной проблемой является то, что в настоящее время отсутствуют общеизвестные и общепринятые методики расчета процесса нагрева металлического лома в системе Consteel, что усложняет проектирование таких систем и системную работу по поиску рациональных параметров технологии.

Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является разработка методики расчета процесса нагрева металлического лома в системе Consteel.

Основной материал исследования

В основу разрабатываемой расчетной методики положен метод тепловой диаграммы Семикина, используемый для практических расчетов нагрева металла.

Нагрев лома рассмотрен как нагрев движущейся непрерывной стальной плиты, при этом неоднородность завалки учтена за счет использования специальных приведенных теплофизических характеристик. В качестве плотности материала используем насыпную плотность лома; в качестве теплоемкости – реальную теплоемкость лома, а коэффициент теплопроводности слоя лома упрощенно определяем как произведение реальной теплопроводности стали на отношение насыпной плотности лома к реальной плотности стали.

Для проведения расчета задается среднemasовая температура лома на входе в конвейер $t_{нач}$, а также температура отходящих газов на входе в конвейер (со стороны печи) t_{nc}^{ex} и на выходе из конвейера t_{nc}^{6bx} . Условно конвейер по длине разделяется на n -е количество участков. Эти участки ограничены $n+1$ контрольными границами. Нумерация участков и границ ведется от загрузочного конца конвейера к ДСП. Таким образом, для каждого участка среднemasовая температура лома на входе и выходе обозначается как: $t_{m.cm}^i$ и $t_{m.cm}^{i+1}$, а температура продуктов сгорания на входе и выходе обозначается как: t_{nc}^{i+1} и t_{nc}^i .

Согласно исходным данным для расчета $t_{m.cm}^1 = t_{нач}$, $t_{nc}^{n+1} = t_{nc}^{ex}$, $t_{nc}^1 = t_{nc}^{6bx}$. Лом перемещается на конвейере со скоростью v . В результате проведения расчетов необходимо установить значение среднemasовой температуры лома, подаваемого в ДСП $t_{m.cm}^{n+1}$.

На основании исходных данных задаются температуры продуктов сгорания на всех границах участков: $t_{nc}^{i+1} = t_{nc}^i + (t_{nc}^{ex} - t_{nc}^{6bx})/n$. Для каждого участка, начиная от первого, определяем среднemasовую температуру лома на выходе участка.

Алгоритм расчета для каждого участка.

Шаг 1. Составляется уравнение теплового баланса секции:

$$V_{nc}^{ex} \cdot C_{nc}(t_{nc}^{i+1}) \cdot t_{nc}^{i+1} - V_{nc}^{6bx} C_{nc}(t_{nc}^i) \cdot t_{nc}^i = G_{me} \cdot C_m(t_{m.cm}^{i+1}) \cdot t_{m.cm}^{i+1} - G_{me} \cdot C_m(t_{m.cm}^i) \cdot t_{m.cm}^i,$$

где V_{nc}^{ex} – объем продуктов сгорания, поступающих в конвейер, м³/с; $C_{nc}(t_{nc}^{i+1})$ – теплоемкость

продуктов сгорания, поступающих в конвейер, кДж/(м³·К); $V_{nc}^{обл}$ – объем продуктов сгорания, покидающих конвейер, м³/с; $C_{nc}(t_{nc}^i)$ – теплоемкость газов, покидающих конвейер (секцию), кДж/(м³·К); G_{me} – массовый расход металлического лома, кг/с; $C_m(t_{m,cm}^{i+1})$ – теплоёмкость лома при среднемассовой температуре на выходе из секции, кДж/(кг·К); $C_m(t^i)$ – теплоёмкость температуры лома, входящего в секцию, кДж/(кг·К).

Шаг 2. Из уравнения теплового баланса определяем среднемассовую температуру лома на выходе секции:

$$t_{m,cm}^{i+1} = \frac{V_{nc}^{обл} \cdot C_{nc}(t_{nc}^{i+1}) \cdot t_{nc}^{i+1} - V_{nc}^{обл} \cdot C_{nc}(t_{nc}^i) \cdot t_{nc}^i + G_{me} \cdot C_m(t^i) \cdot t^i}{G_{me} \cdot C_m(t_{m,cm}^{i+1})}$$

Далее организуется итерационная вычислительная схема:

Шаг 3а – предварительно задается температура поверхности лома на выходе рассматриваемого участка $t_{нов}^{i+1}$;

Шаг 3б – определяется плотность теплового потока, падающего на поверхность лома в начале и конце участка:

$$q^i = C_{np} \left[\left(\frac{t_{nc}^i + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{нов}^i + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{конв} \cdot (t_{nc}^i - t_{нов}^i),$$

$$q^{i+1} = C_{np} \left[\left(\frac{t_{nc}^{i+1} + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_{нов}^{i+1} + 273}{100} \right)^4 \right] + \alpha_{конв} \cdot (t_{nc}^{i+1} - t_{нов}^{i+1}),$$

где C_{np} – приведенный коэффициент излучения, Вт/(м²·К⁴); $\alpha_{конв}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи, $\alpha_{конв}=20$ Вт/(м²·К).

Приведенный коэффициент излучения:

$$C_{np} = C_0 \cdot \varepsilon_m \cdot \omega + 1 - \varepsilon_2 \times \left([\varepsilon_m + \varepsilon_2(1 - \varepsilon_m)] \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2} + \omega \right)^{-1},$$

где C_0 – константа излучения абсолютно черного тела, $C_0=5,67$ Вт/(м²·К⁴); ε_m – степень черноты металла, $\varepsilon_m=0,8$; ε_2 – степень черноты газов; ω – степень развития кладки.

Шаг 3в – определяется значение итогового коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{q^{i+1}}{t_{nc}^{i+1} - t_{m,cm}^{i+1}}$$

Шаг 3г – определяется значение критерия Био:

$$Bi = \frac{\alpha \cdot r}{\lambda(t_{m,cm}^{i+1}) \left(\frac{\rho_{нас}}{\rho_{мет}} \right)},$$

где $\rho_{нас}$ – насыпная плотность металлолома; $\rho_{мет}$ – плотность металла, $\rho_{мет}=7800$ кг/м³; $\lambda(t_{m,cm}^{i+1})$ – коэффициент теплопроводности стали при среднемассовой температуре металлолома, Вт/(м·К).

Шаг 3д – по специальным таблицам [15] уточняются значения коэффициентов κ_2 и κ_3 в зависимости от значения безразмерного критерия Био.

Шаг 3е – определение перепада температуры по толщине засыпи лома:

$$\Delta t = \frac{q^{i+1} \cdot r}{\kappa_2 \cdot \lambda(t_{m,cm}^{i+1}) \left(\frac{\rho_{нас}}{\rho_{мет}} \right)},$$

где r – толщина слоя лома, м; κ_2 – коэффициент усреднения теплового потока.

Шаг 3ж – уточняется значение температуры поверхности металлолома в конце участка:

$$t_{нов}^{i+1} = t_{m,cm}^{i+1} + \frac{\kappa_3 - 1}{\kappa_3} \cdot \Delta t,$$

где κ_3 – коэффициент усреднения температуры по сечению тела.

Если отличие температуры поверхности, определенной на шаге 3ж, отличается от предварительного значения более чем на 1 °С, происходит возврат на шаг 3а со значением $t_{нов}^{i+1}$, определенным на шаге 3ж.

Шаг 4. Для дальнейших расчетов используется значение q^{i+1} , соответствующее окончательно установленному значению $t_{нов}^{i+1}$.

Шаг 5. Определяем среднелогарифмическое значение плотности теплового потока на поверхность лома в пределах рассматриваемого участка:

$$\bar{q} = (q^i - q^{i+1}) \cdot \left(\ln \frac{q^i}{q^{i+1}} \right)^{-1},$$

Шаг 6. Определяется требуемое время нагрева лома на участке:

$$\tau = \frac{r \cdot \rho_{нас} \cdot C_m(t_{m,cm}^{i+1}) \cdot t_{m,cm}^{i+1} - C_m(t^i) \cdot t^i \cdot 10^3}{\kappa_1 \cdot \bar{q} \cdot 60},$$

где κ_1 – коэффициент материальной нагрузки.

Если задана скорость движения конвейера, то длина каждого участка определяется путем перемножения расчетного времени пребывания лома в нем и этой скорости. Если же задана длина конвейера, то скорость его движения определяется как отношение этой длины к общему времени пребывания металла на всех участках.

На рис. 1 графически отобразим сущность работы системы Consteel при использовании представленной методики расчета предварительного нагрева лома.

Использование разработанной методики проиллюстрировано на тех примерах, для которых имеются следующие общие исходные данные: массовый расход лома $G_{me}=27,78$ кг/с; насыпная плотность лома $\rho_{nac}=2500$ кг/м³; толщина засыпи лома $r=0,5$ м. Параметры поперечного сечения туннеля конвейера: транспортер шириной 2200 мм, имеющий общую длину примерно 115 м, из которых длина завалочного транспортера составляет 75 м, а длина транспортера печи предварительного нагрева – 40 м при высоте туннеля 0,7 м; температура газов, покидающих конвейер, составляет $t_{nc}^{6вх}=300$ °С.

Расчет ведется методом последовательных приближений. Для трех наборов дополнительных исходных данных получены результаты, представленные в табл. 1...3.

Вариант 1.

Дополнительные исходные данные: дымовые газы, отапливающие конвейер, образуются только от работы 6 сводовых газокислородных горелок мощностью 5 МВт с учетом подсоса воздуха $V_{nc}^{6вх}=V_{nc}^{6вых}=4,154$ м³/с; температура газов, поступающих на вход четвертого участка, $t_{nc5}=750$ °С. Результаты расчетов представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что за 116 минут нагреть лом за счет теплоты отходящих газов можно до среднemasсовой температуры 221 °С при температуре поверхности 574 °С. Соответственно, скорость движения транспортера составит $v=0,006$ м/с.

Вариант 2.

Дополнительные исходные данные: объем продуктов сгорания, поступающих в конвейер из ванны ДСП при горении электрической дуги $V_{nc}^{6вх}=V_{nc}^{6вых}=1,656$ м³/с; температура газов, поступающих на конец четвертого участка $t_{nc5}=950$ °С. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

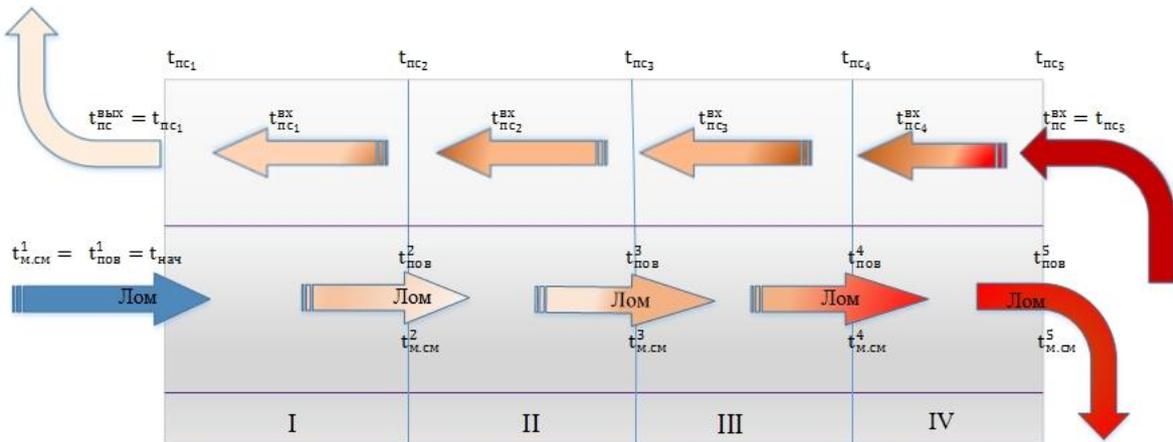


Рис. 1. Общая схема предварительного нагрева лома в системе Consteel

Табл. 1. Расчет времени нагрева металлолома при температуре отходящих газов 750 °С

№ участка	$t_{нач},$ °С	$t_{нов},$ °С	$t,$ °С	$t_{м.см},$ °С	$q_n,$ Вт/м ²	$q_k,$ Вт/м ²	$\bar{q},$ Вт/м ²	κ_2	κ_3	$\tau,$ МИН
1	20	210	207	73	10142	12181	11131	1,863	2,926	49
2	73	320	300	122	16724	17430	17074	1,851	2,918	30
3	122	443	413	171	25837	23480	24640	1,836	2,909	21
4	171	574	539	221	38817	29738	34076	1,819	2,898	16

Табл. 2. Расчет времени нагрева металлолома при температуре отходящих газов 950 °С

№ участка	$t_{нач},$ °С	$t_{нов},$ °С	$t,$ °С	$t_{м.см},$ °С	$q_n,$ Вт/м ²	$q_k,$ Вт/м ²	$\bar{q},$ Вт/м ²	κ_2	κ_3	$\tau,$ МИН
1	20	218	250	53	10180	14812	12351	1,872	2,93	27
2	53	383	453	85	21745	26436	24014	1,848	2,916	14
3	85	570	691	118	39692	39656	39674	1,829	2,904	9
4	118	761	931	151	70247	52359	60865	1,806	2,89	6

Табл. 3. Расчет времени нагрева металлолома при температуре отходящих газов 1300 °С

№ участка	$t_{нач}$, °С	$t_{пов}$, °С	t , С	$t_{м.см}$, °С	$Q_{н}$, Вт/м ²	$Q_{к}$, Вт/м ²	\bar{q} , Вт/м ²	κ_2	κ_3	τ , МИН
1	20	287	330	69	10180	19540	14355	1,871	2,929	33
2	69	585	706	120	29916	40733	35047	1,838	2,91	14
3	20	885	1092	172	71396	61005	66064	1,804	2,886	8
4	172	1177	1464	224	154688	78300	112193	1,766	2,866	5

Из табл. 2 видно, что за 56 минут нагреть лом удалось до среднemasсовой температуры 151 °С при температуре поверхности 761 °С. Скорость движения транспортера составит $v=0,012$ м/с.

Вариант 3.

Дополнительные исходные данные: объем продуктов сгорания, поступающих в конвейер из ванны ДСП при горении электрической дуги $V_{nc}^{ex}=V_{nc}^{бых}=1,656$ м³/с; температура газов, поступающих на конец четвертого участка $t_{nc5}=1300$ °С. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что достичь среднemasсовую температуру лома 224 °С получается за 60 минут при температуре поверхности 1177 °С. Скорость движения транспортера составит $v=0,011$ м/с.

Выводы

В работе составлена и апробирована методика для расчета процесса нагрева металлического лома в системе Consteel, предполагающей непрерывную подачу металлолома в дуговую сталеплавильную печь при помощи конвейера. В основе предложенной методики лежит метод тепловой диаграммы Семикина, при помощи которого рассчитываются процессы нагрева и охлаждения сплошных тел. Нагрев лома рассмотрен как нагрев движущейся непрерывной стальной плиты, при этом неоднородность завалки учтена за счет использования специальных приведенных теплофизических характеристик. Предложенная методика позволяет учесть изменение расхода и температуры газов, поступающих в туннель конвейера со стороны ДСП, что дает возможность вести расчет нагрева лома для разных характерных периодов работы печи.

С использованием методики проведены расчеты для ДСП производительностью 100 т/ч для разных температур газов, покидающих печь. Полученные результаты соответствуют практическому опыту эксплуатации ДСП с системой Consteel. Предложенная методика позволяет на стадии проектирования дуговых сталеплавильных печей выбрать рациональную мощность печного трансформатора и сводовых горелок с учетом теплового потока, возвращаемого в печь с подогретым металлоломом.

Список литературы

1. Рябов, А.В. Современные способы выплавки стали в дуговых печах: учеб. пособие / А.В. Рябов, И.В. Чуманов, М.В. Шишимиров. – М.: Теплотехника, 2007. – 197 с.
2. Тулуевский, Ю.Н. Новые возможности печей Consteel / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров, В.Г. Швер // Производство чёрных металлов. – 2011. – №6. – С. 22-27.
3. Свинолобов, Н.П. Печи черной металлургии: учебное пособие для вузов / Н.П. Свинолобов, В.Л. Бровкин. – Днепропетровск: Пороги, 2004. – 154 с.
4. Кудрин, В.А. Теория и технология производства стали. – М.: Мир, ООО «Издательство АСТ», 2003. – 528 с.
5. Ровин, Л.Е. Ресурсосбережение при электроплавке / Л.Е. Ровин, С.Л. Ровин // Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого: научно-практический журнал. – 2013. – №4. – С. 11-24.
6. Prospects for Consteel Technology in Russia / A.G. Kuz'menko [et al.] // Steel in Translation. – 2016. – No.4. Vol.46. – P. 270-275.
7. Маркоцци, М. Совершенствование предварительного нагрева и важность работы электродуговых печей большой емкости с жидким остатком / М. Маркоцци, М. Гацзон // Металлургическое производство и технология. – 2011. – №2. – С. 8-20.
8. Development of flexible operating practices to produce steel with Consteel EAF process in ORI Martin plant / A. Di Donato [et al.] // 7th European Electric Steelmaking Conference, Venice, IT, May 26-29, 2002 // Steel Times International. – 2002. – Vol.1. – P. 72-82.
9. Чаймелов, А.А. Энергоэффективный стенд для сушки и нагрева лома / А.А. Чаймелов, К.В. Строгонов // Энергетика и теплоэнергетика. – 2018. – №3. – С. 2-6.
10. Vallomy, J.A. The Consteel Process for Continuous Melting-Refining in the Electric Furnace and Its Impact on Energy Conservation and Environment // Proceedings of The Sixth International Iron and Steel Congress, 1990, Nagoya, ISIJ. – P. 82-89.
11. Giavani, C. CONSTEEL Evolution: The Proven Technology for Maximum EAF Charging Flexibility // Proc. 19th Middle East Iron & Steel

- Conf. Dubai, 14-16 December, 2015 // Steel Times International. – 2015. – Nov./Dec. – P. 5-9.
12. Fanutti, G. Environmental Control and the CONSTEEL Process / G. Fanutti, M. Pozzi // Millennium Steel. – 2004. – P. 105-110.
13. Charging hot metal to the EAF using Consteel / T. Jiemin [et al.] // Steel Times International. – 2005. – No.4. Vol.29. – P. 34-39.
14. Тулуевский, Ю.Н. Топливодуговой сталеплавильный агрегат нового поколения / Ю.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров // Экология и промышленность. – 2014. – №1. – С. 30-35.
15. Казанцев, Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчётов и проектирования. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1975. – 368 с.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/, P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/, V.A. Shatovich
Donetsk National Technical University (Donetsk)

HEAT RECOVERY OF GASES COMING FROM AN ARC STEEL FURNACE TO PREHEAT SCRAP METAL

Background. *In the current production, any industrial enterprise sets objective goals: the use of secondary energy resources (heat from exhaust gases or waste gases) and reducing energy consumption. There are no available methods for calculating the preheating of scrap by waste gases from an arc steel furnace (ASF), so the goal of this work is to create such an approach.*

Materials and/or methods. *The proposed method is based on the Semikin thermal diagram method used to calculate the heating and cooling of solids. Scrap heating is considered as heating of a moving continuous steel plate while taking into account the inhomogeneity of filling due to the use of unique reduced thermal characteristics.*

Results. *The proposed method allows taking into account the change in the flow rate and temperature of gases entering the conveyor tunnel from the ASF side, which enables calculating the heating of scrap for various characteristic periods of operation of the furnace. With this method, calculations made for ASF with a capacity of 100 t/h at different temperatures of gases escaping from the furnace. The results obtained correspond to the practical experience of using ASF with the Consteel system.*

Conclusion. *The proposed method allows choosing the rational power of the furnace transformer and arch burners at the design stage of the ASF, taking into account the heat flow returned to the furnace with heated scrap metal.*

Keywords: *arc steel furnace, waste gases, Consteel system, heating of scrap metal, heat recovery.*

Сведения об авторах

А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680
 Author ID: 7006918782
 ORCID iD: 0000-0002-8146-2017
 Телефон: +380 (71) 405-89-73
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

В.А. Шатович

SPIN-код: 2790-8418
 Author ID: 1053571
 Телефон: +380 (71) 312-88-59
 Эл. почта: shatovichviktoria23@gmail.com

П.А. Гнитиёв

SPIN-код: 1943-4196
 Author ID: 56916104300
 ORCID iD: 0000-0001-9266-7969
 Телефон: +380 (71) 321-50-15
 Эл. почта: paul.gnitiev@mail.ru

Статья поступила 22.06.2020 г.

© А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв, В.А. Шатович, 2020
 Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров