

УДК 669.041:621.365.22

С.А. Храпко, А.В. Старосоцкий, М.В. Зайцев,
С.В. Онищук, И.П. Тищенко**РАСЧЁТ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В ДУГОВОЙ ПЕЧИ С
УЧЁТОМ МАССЫ «БОЛОТА»**

Статья посвящена разработке упрощённой модели прогноза температуры металла в дуговой печи. Рассмотрены особенности известных моделей, проанализировано влияние технологических факторов на результаты замеров температуры. Предложен алгоритм, позволяющий учесть влияние «болота» на тепловой баланс плавки и ориентировочно оценить ожидаемую скорость нагрева металла в дуговой печи. Показана существенная роль тепла «болота» и футеровки в процессе расплавления завалки, которое на отдельных плавках достигает 30% от теоретически необходимого тепла.

Дуговая сталеплавильная печь, тепловой баланс, коэффициент нагрева, теплоёмкость, футеровка, тепловые потери.

При выплавке стали в современной дуговой печи особую актуальность приобретает надежность прогноза температуры жидкого металла. Это связано с тем, что для повышения производительности агрегата и снижения себестоимости металла в современной технологии выплавки стали принято совмещение окислительного периода и плавления шихты, в результате чего продолжительность «доводки» металла (после оседания шихты, отбора пробы и замера температуры до выпуска) стала весьма короткой (10-15 минут). На многих заводах производится не более 2-х замеров температуры и отборов проб металла, а иногда и меньше, при этом металл выпускают по расчетной температуре, а результаты 2-й (контрольной) пробы приходят уже после выпуска металла в ковш.

К сожалению, строгий расчёт теплового баланса весьма громоздок и требует большого количества информации, которая либо отсутствует на реальном производстве (например, объём, температура, состав отходящих газов и др.), либо принципиально недоступна в реальных условиях (химический состав, теплопроводность, теплоёмкость, влажность, замусоренность лома и др.). Кроме того,

© Храпко С.А., Старосоцкий А.В., Зайцев М.В.,
Онищук С.В., Тищенко И.П., 2010

необходимо учитывать, что температурная неоднородность даже только жидкой ванны (разность между замером на поверхности и средней температурой) может достигать 60 °С и более [1,2].

В данной работе рассмотрено влияние массы «болота» на температуру жидкого металла в ДСП.

Обычно в основе большинства систем прогноза температуры лежит допущение, что изменение температуры металла ΔT прямо пропорционально удельному количеству введенной суммарной энергии ΔE с некоторым коэффициентом k (°С/[кВт·ч/т]), зависящим от текущей температуры металла и, иногда, других факторов.

Зависимость указанного коэффициента от температуры обычно объясняется зависимостью тепловых потерь теплопроводностью и излучением от температуры – чем выше температура металла, тем больше потери, и меньше нагрев металла на единицу энергии.

В работе [3] для численного анализа в качестве исходных данных были использованы показатели работы электросталеплавильного комплекса ООО «Электросталь», при этом было проанализировано изменение температуры между двумя замерах на 1730 плавках (3470 экспериментальных точек). В качестве зависимой переменной использовалось отношение прироста температуры $\Delta T = T_2 - T_1$ к удельному расходу суммарной энергии ΔE (электрической и альтернативной), в качестве аргумента – начальная температура металла на интервале. В результате получили следующее уравнение (рис. 1):

$$\Delta T = (13,45 - 0,0081 \cdot T_1) \cdot \Delta E \quad (R=0,50). \quad (1)$$

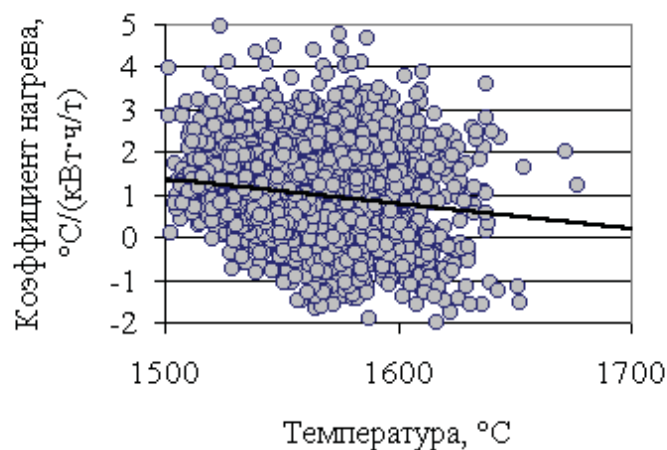


Рис. 1 – Зависимость коэффициента нагрева металла от начальной температуры (T_1)

Большой разброс экспериментальных данных говорит о том, что в типичных условиях современной интенсивной технологии

сталеварения по замеренной температуре невозможно однозначно определить (предсказать) ожидаемую скорость дальнейшего нагрева металла, поскольку здесь наблюдается взаимно противоположное влияние двух факторов: с одной стороны, чем выше температура замера, тем будут больше тепловые потери и меньше коэффициент нагрева; с другой стороны, чем выше температура замера, тем более полно расплавлена металлозавалка и можно ожидать более высокий коэффициент нагрева. Возможно, при высокой температуре преобладает влияние первого фактора (поскольку более вероятно полное расплавление металлозавалки), а при низкой – второго, однако определить эту границу не представляется возможным.

Необходима дополнительная информация, характеризующая состояние сталеплавильной ванны. Например, о полноте расплавления завалки можно судить по количеству энергии, введенной в печь к моменту первого замера температуры. Кроме того необходимо учесть, что тепловые потери растут с увеличением времени между замерами, т.е. интервал времени между замерами также должен быть включен в модель. Обработка данных в этом случае дает уравнение [3]:

$$\Delta T = (17,47 - 0,0124 \cdot T_1 + 0,0085 \cdot E_1) \cdot \Delta E - 1,886 \cdot \Delta \tau_{12} \quad (R=0,61). \quad (2)$$

Знаки и величины полученных коэффициентов не противоречат теоретическим положениям и практике сталеварения. Чем больше температура металла, тем меньше тепловой эффект от вводимой энергии, что объясняется существенным повышением потерь излучением и теплопроводностью. Чем больше величина введенной энергии к моменту первого замера, тем меньше осталось в ванне нерасплавленного лома, тем лучше прогрета футеровка, что приводит к повышению коэффициента использования тепла непосредственно на нагрев жидкой ванны. И наконец, время между замерами увеличивает потери тепла – падение температуры металла при простое составляет около 2 °С за минуту, что по порядку величины соответствует реальным данным. К сожалению, среднеквадратическое отклонение (σ) для формулы (2) составляет около 30 °С, что явно велико для надежного прогноза температуры. Попытки отдельно учесть электрическую и альтернативную энергию (как в E_1 , так и в ΔE) не дают существенного повышения коэффициента корреляции R и снижения среднеквадратического отклонения σ .

Для повышения точности в формуле (2) желательно также учесть продолжительность плавки (это влияет на величину потерь тепла в период плавления), а также продолжительность межплавочного

простая пустой печи, однако в рассмотренном массиве эти данные отсутствовали.

Имеется ещё одна причина, существенно влияющая на прогноз температуры, которую трудно учесть в простой линейной модели – масса «болота», которая может варьировать в широких пределах, а также масса, теплоёмкость и теплопроводность огнеупорной футеровки.

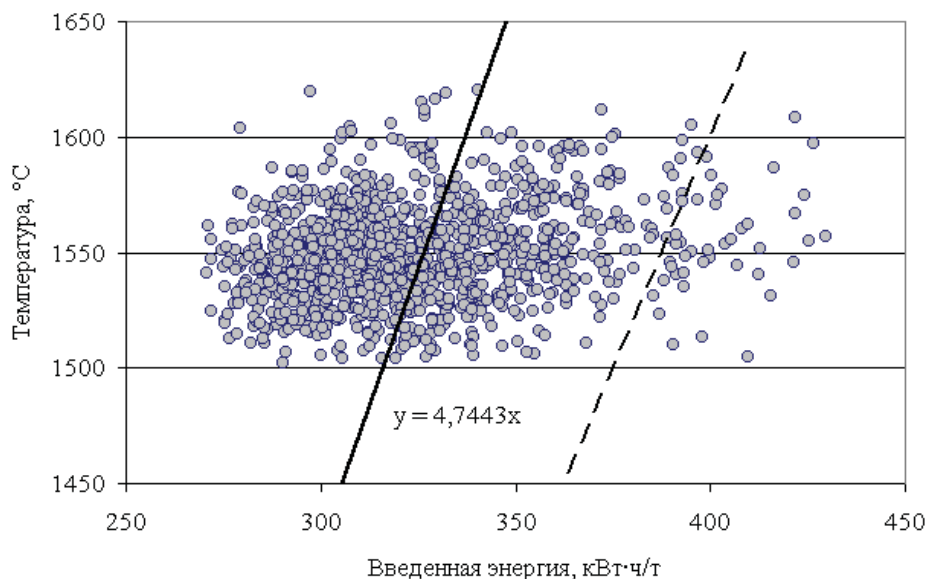


Рис. 2 – Зависимость первого замера температуры (Т1) от введенной энергии (Е1)

На рис. 2 приведена зависимость первого замера температуры от суммарной введённой энергии к этому моменту. Отношение температуры к введённой энергии изменяется в очень широких пределах – от 3,6 до 5,8 °C/(кВт·ч/т), и в среднем составляет 4,74 °C/(кВт·ч/т). В то же время средняя удельная теплоёмкость железа в интервале температур 0 – 1600 °C составляет около 0,21 кВт·ч/(т·°C) (в том числе с учётом теплоты плавления), что приблизительно соответствует максимально возможному коэффициенту нагрева металла 4,76 °C/(кВт·ч/т). В действительности эта величина должна быть ещё меньше за счет достаточно больших тепловых потерь в ДСП. Средний расход общей энергии за рассмотренный период на данном массиве плавок составляет около 410 кВт·ч/т на тонну лома при средней температуре выпуска 1613 °C, что соответствует коэффициенту нагрева 4 °C/(кВт·ч/т) (пунктирная линия на рис. 2).

Таким образом, все точки левее пунктирной линии соответствуют дополнительному приходу тепла в ванну до первого замера, а именно,

за счет тепла «болота» (и тепла огнеупорной футеровки). Точки справа – скорее всего, плавки после длительных простоев и первые плавки в серии (без «болота»). Увеличение массы «болота» хотя и снижает расход тепла на расплавление металлозавалки, однако приводит к тому, что дальнейший нагрев металла до температуры выпуска требует существенно больших затрат тепла (необходимо греть не только завалку, но и «болото»), и это должна учитывать тепловая модель. Хотя достоверные данные о массе «болота» в реальных условиях отсутствуют, её можно ориентировочно оценить по соотношению полученной температуры первого замера и количества введённой энергии.

Упрощённо среднюю температуру металлозавалки к моменту первого замера можно записать в виде:

$$\bar{T}_1 = \frac{c_b M_b T_b + k_1 M_l E_1}{c_b M_b + c_l M_l}, \quad (3)$$

где c_b , M_b , T_b – удельная теплоёмкость, масса и температура болота; c_l и M_l – удельная теплоёмкость и масса металлолома; E_1 и k_1 – суммарная введенная удельная энергия (на тонну металлолома) и коэффициент её использования в период плавления. Числитель представляет собой сумму тепла, вносимого «болотом», и тепла, вносимого энергоносителями (с учётом коэффициента полезного использования). Знаменатель представляет собой суммарную теплоёмкость металлозавалки и «болота».

Реальная температура замера (показания термопары) всегда выше средней температуры:

$$T_1 = \frac{\bar{T}_1}{k_p}, \quad (4)$$

где k_p - коэффициент расплавления завалки ($k_p \leq 1$).

Выразив из (3) массу «болота», получим:

$$M_b = \frac{k_p c_l T_1 - k_1 E_1}{c_b (T_b - k_p T_1)} M_l. \quad (5)$$

Температуру последнего замера оценим по следующей формуле (считая, что к концу плавки металлолом полностью расплавлен):

$$T_2 = \bar{T}_1 + \frac{k_2 M_l \Delta E}{c_b M_b + c_l M_l} - d \Delta \tau, \quad (6)$$

где ΔE и k_2 – введённая удельная энергия (на тонну металлолома) и коэффициент её использования в период нагрева жидкой ванны.

Подставив (5) и (4) в (6), получим выражение для изменения температуры металла между замерами:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1(1 - k_p) + \frac{k_2 \Delta E (T_6 - k_p T_1)}{c_d T_6 - k_1 E_1} - d \Delta \tau. \quad (7)$$

Отметим, что из (3) (или (4)) в (6) фактически подставляется не масса «болота» M_6 , а произведение $c_6 M_6$ – интегральная теплоёмкость «болота», в которое в данном случае входит не только фактический остаток металла от предыдущей плавки, но и часть огнеупорной футеровки, аккумулирующей тепло в период рафинирования, и отдающей его металловозвалке в период расплавления. По этой причине попытки рассчитать реальную массу «болота» по формуле (5) из экспериментальных данных дают завышенные результаты (20-30 тонн при средней массе выпуска 57-59 тонн), хотя для нашего расчёта это не принципиально.

В первом приближении примем, что коэффициент расплавления завалки линейно зависит от температуры замера по интерполяционной формуле:

$$k_p = 1 - k^* (T^* - T_1), \quad (8)$$

где k^* и T^* – подгоночные коэффициенты, причём физический смысл параметра T^* соответствует фиктивной температуре, при которой металловозалка должна быть полностью расплавлена. Естественно, что при $T_1 > T^*$ коэффициент k_p считается равным единице.

Подстановка (8) в (7) дает конечную расчётную формулу:

$$\Delta T = k^* T_1 (T^* - T_1) + k_2 \Delta E \frac{(T_6 - (1 + k^* (T_1 - T^*)) T_1)}{c_d T_6 - k_1 E_1} - d \Delta \tau. \quad (9)$$

Обработка имеющихся данных с использованием пакета Statistica даёт следующие значения параметров формулы (9), при этом стандартная ошибка полученной формулы составляет менее 20 °C (R=0,71, всего 1178 плавов):

$$\begin{aligned} k_1 &= 0,897; & k_2 &= 0,170; & k^* &= 0,0004; \\ T^* &= 1605 \text{ °C}; & T_6 &= 1610,5 \text{ °C}; & d &= -1,54 \text{ °C/мин}; \\ c_d &= 0,252 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/(\text{т}\cdot\text{°C}). \end{aligned}$$

Интересно, но средняя температура «болота» T_6 оказалась очень близка к средней по данному массиву температуре выпуска металла из печи, которая составляет 1613 °C. Эффективность использования тепла в период расплавления k_1 (до первого замера температуры) составила 90%, а в период нагрева k_2 – в 5 раз меньше, что также

совпадает с наблюдаемыми на практике величинами. Следует отметить, что в упрощённой модели не учитывалось влияние отдаваемых шлакообразующих (около 35 кг/т лома) и моментов их отдачи (например, в бадью или в ванну непосредственно перед замером). Возможно именно шлакообразующие а также влага и замусоренность металлолома (6-8%, т.е. 60-80 кг/т лома) и привели к несколько завышенной оценке теплоёмкости металлозавалки по сравнению с теплоёмкостью чистого железа (теплоёмкость извести и других оксидов составляет около 0,33 кВт·ч/(т·°С), а известняка и доломита – ещё выше, что в сумме ориентировочно и дает полученную величину c_d). Кроме того, для анализа был использован практически «сырой» массив исходных данных, т.е. не производились ни фильтрация недостоверных замеров, ни отсеивание плавков после длительных простоев и т.д. Тем не менее, полученные коэффициенты по порядку величины не противоречат интуитивно ожидаемым – температура «болота» и температура полного расплавления ванны, коэффициенты использования тепла в периоды расплавления и нагрева жидкой ванны, потери тепла ванной при простоях соответствуют общепринятой практике сталеварения.

Таким образом, предложенный алгоритм позволяет ориентировочно оценить ожидаемую скорость нагрева металла в ДСП и с приемлемой точностью прогнозировать текущую температуру сталеплавильной ванны. Проведенный анализ свидетельствует о существенной роли тепла «болота» и тепла, аккумулированного футеровкой в процессе расплавления завалки – на отдельных плавках до 30% от теоретически необходимого.

ЛИТЕРАТУРА

1. Об оценке температурной неоднородности ванны сталеплавильного агрегата. Скрябин В.Г., Скрябин Д.В., Кучеренко О.Л., Старосоцкий А.В., Храпко С.А. Теория и практика металлургии, 2004. – № 6. – С. 18-21.
2. Модель расчёта средней температуры металла в сверхмощной ДСП и ее применение в АСУТП. В.Г. Скрябин, Д.В. Скрябин. Материалы 2-й международной научно-практической конференции «Автоматизированные печные агрегаты и энергосберегающие технологии в металлургии» (3—5 декабря 2002 г., г. Москва). — М.: МИСиС. — С. 466—468.
3. Прогноз температуры металла в дуговой печи. Храпко С.А., Серов А.И. Сборник трудов ДонНТУ, вып. № 11 (159) А, Донецк, 2009 г. – С. 66-72.