

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТАЛЛА В ДУГОВОЙ ПЕЧИ ОТ МАССЫ «БОЛОТА»

С.А. Храпко, А.В. Старосоцкий, М.В. Зайцев, И.П. Тищенко
ДонНТУ, ООО НПП «ОРАКУЛ», ООО «Электросталь»

Розглянуті особливості відомих моделей, проаналізований вплив технологічних факторів на результати вимірів температури. Запропонований алгоритм, що дозволяє врахувати вплив "болота" на тепловий баланс плавки й орієнтовно оцінити очікувану швидкість нагріву металу в дуговій печі. Показана істотна роль тепла "болота" і футерівки.

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, при этом металл выпускают по расчетной температуре, а результаты 2-й (контрольной) пробы приходят уже после выпуска металла в ковш. Такая ситуация резко повышает требования к точности прогноза температуры жидкого металла по ходу плавки.

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.).

Говоря о температуре металла, необходимо различать собственно температуру замера (в конкретной точке ванны), среднюю температуру жидкого металла и среднюю температуру металлозавалки (на откосах или на подине могут оставаться нерасплавленные куски лома). Например, в работе [1] отмечено, что температурная неоднородность даже только жидкой ванны (разность между замером на поверхности и средней температурой) может достигать 60 °С и более.

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 ($^{\circ}\text{C}/[\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{т}]$), зависящим от текущей температуры металла и, иногда, от средневзвешенного вида металлолома («хороший» лом требует меньше тепла на расплавление и нагрев, «плохой» – больше).

Для численного анализа в качестве исходных данных были использованы показатели работы ДСП-1 электросталеплавильного комплекса ООО «Электросталь» (г. Курахово), которая была сдана в эксплуатацию в середине 2008 года (изготовитель – фирма STB, Италия). Для проверки было проанализировано изменение температуры между двумя замерами на 1730 плавках (всего 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. В результате получили [2]:

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

Большой разброс экспериментальных данных ($R=0,50$) говорит о том, что в типичных условиях современной интенсивной технологии сталеварения по замеренной температуре невозможно однозначно определить ожидаемую скорость дальнейшего нагрева металла, поскольку 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 [2].

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

На рис. 1 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 °С/(кВт·ч/т), и в среднем составляет 4,74 °С/(кВт·ч/т). В то же время средняя удельная теплоёмкость железа в интервале температур 0 – 1600 °С составляет около 0,21 кВт·ч/(т·°С) (в том числе с учётом теплоты плавления), что приблизительно соответствует максимально возможному коэффициенту нагрева металла 4,76 °С/(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 °С, что соответствует коэффициенту нагрева 4 °С/(кВт·ч/т) (пунктирная линия на рис. 1). 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»).

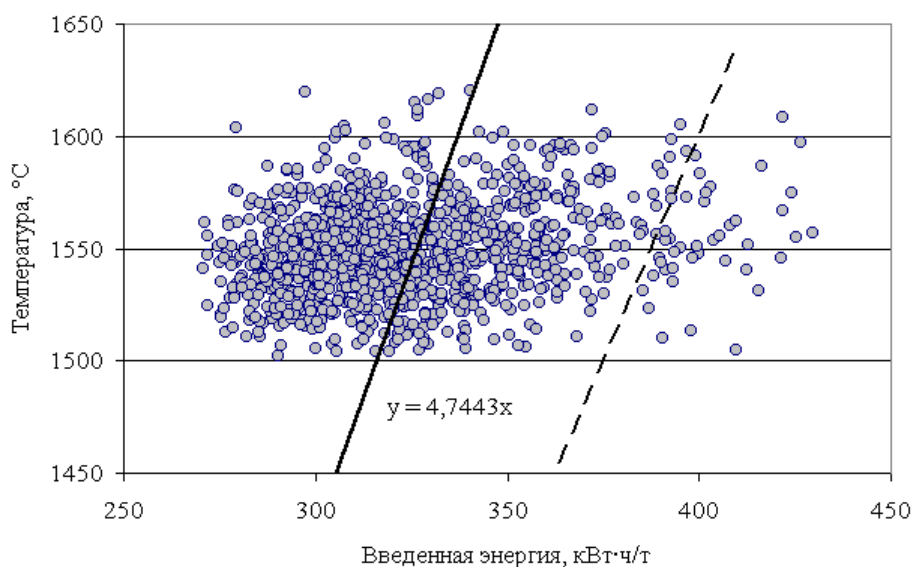


Рис. 1. Зависимость температуры (Т1) от введенной энергии (Е1).

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»). Хотя достоверные данные о массе «болота» в реальных условиях отсутствуют, её можно ориентировочно оценить по соотношению по-

лученной температуры первого замера и количества введённой в печь энергии.

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

$$\bar{T}_1 = \frac{c_{\delta}M_{\delta}T_{\delta} + k_1M_{\lambda}E_1}{c_{\delta}M_{\delta} + c_{\lambda}M_{\lambda}}, \quad (2)$$

где c_{δ} , M_{δ} , T_{δ} – удельная теплоёмкость, масса и температура болота; c_{λ} и M_{λ} – 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.

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

$$T_1 = \frac{\bar{T}_1}{k_p}, \quad (3)$$

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

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

$$T_2 = \bar{T}_1 + \frac{k_2M_{\lambda}\Delta E}{c_{\delta}M_{\delta} + c_{\lambda}M_{\lambda}} - d\Delta\tau, \quad (4)$$

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

Подставив (2) и (3) в (4), получим выражение для изменения температуры металла между замерами:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = T_1(1 - k_p) + \frac{k_2\Delta E(T_{\delta} - k_p T_1)}{c_{\lambda}T_{\delta} - k_1 E_1} - d\Delta\tau. \quad (5)$$

Отметим, что из (2) в (4) фактически подставляется не масса «болота» M_{δ} , а произведение $c_{\delta}M_{\delta}$ – 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 металлозавалке в период расплавления. По этой причине попытки рассчитать реальную массу «болота» по формуле (2) из экспериментальных данных дают завышенные результаты (20-30 тонн при средней массе выпуска 57-59 тонн).

Примем, что коэффициент расплавления завалки линейно зависит от температуры замера по интерполяционной формуле:

$$k_p = 1 - k^*(T^* - T_1), \quad (6)$$

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

Подстановка (6) в (5) дает конечную расчётную формулу:

$$\Delta T = k^* T_1 (T^* - T_1) + k_2 \Delta E \frac{(T_6 - (1 + k^*(T_1 - T^*)) T_1)}{c_{л} T_6 - k_1 E_1} - d \Delta \tau. \quad (7)$$

Обработка имеющихся данных с использованием пакета Statistica даёт следующие значения параметров формулы (7), при этом стандартная ошибка полученной формулы составляет менее 20 °С (R=0,71, всего 1178 плавов):

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

Интересно, но средняя температура «болота» T_6 оказалась очень близка к средней по данному массиву температуре выпуска металла из печи, которая составляет 1613 °С. 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. 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). Кроме того, для анализа был использован практически «сырой» массив исходных данных. 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.

Выводы

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.

Библиографический список

1. Скрябин В.Г. Об оценке температурной неоднородности ванны сталеплавильного агрегата / В.Г. Скрябин, Д.В.Скрябин, О.Л. Кучеренко, А.В. Старосоцкий, С.А. Храпко // Теория и практика металлургии, 2004. – № 6. – С. 18-21.
2. Храпко С.А. Прогноз температуры металла в дуговой печи / С.А. Храпко, А.И. Серов // Сборник трудов ДонНТУ, вып. № 11 (159) А, Донецк, 2009 г. – С. 66-72.