

роль в этом процессе играет поступление в шлак неметаллических включений, всплывающих из разливаемой стали. При разливке низкоуглеродистой стали масса всплывших неметаллических включений составляет около 30 % от массы конечного шлака, а при разливке низколегируемой стали – около 50 %.

Значительно меньшую роль в изменении химического состава шлака играет растворение огнеупорной футеровки промежуточного ковша. При шамотной футеровке масса растворившихся в шлаке огнеупоров составляет около 5 %, а при магнезиальной футеровке – около 15 % от массы конечного шлака.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Селиванов В.Н., Колесников Ю.А., Буданов Б.А. и др. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2004. № 7. С. 19 – 22.
2. Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Лозовский Е.П. // Расплавы. 2009. № 6. С. 3 – 10.
3. Дюльдина Э.В., Селиванов В.Н., Рыбалко О.Ф.: Тр. XIII Российской конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов». Т. 3. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. С. 119 – 122.

© 2013 г. В.Н. Селиванов, Э.В. Дюльдина, Е.П. Лозовский, А.В. Коротин
Поступила 21 января 2013 г.

УДК 621.774.35:621.789

Г.М. Дружинин¹, Ю.А. Самойлович¹, Е.В. Попов²

¹ Научно-исследовательский институт металлургической теплотехники
² Уральский федеральный университет

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГАРА МЕТАЛЛА В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ В СЛУЧАЕ НЕЗАПЛАНИРОВАННЫХ ДЛИТЕЛЬНЫХ ПРОСТОЕВ

Аннотация. Представлены результаты расчетных исследований с использованием математической модели, позволяющей определить рациональный тепловой режим работы нагревательной печи при длительном незапланированном простое с точки зрения минимизации окисления.

Ключевые слова: нагревательная печь, кинетика окисления, математическая модель, простой, оптимальный тепловой режим.

METALL LOSSES IN HEATING FURNACES ON THE OCCASION OF UNBIDDEN LONG DEMURRAGE COMPUTATION STUDY

Abstract. Results of settlement researches are presented in this article with use of the mathematical model, allowing to define a rational thermal operating mode of the heating furnace at long unplanned idle time from the point of view of Oxidation kinetics minimization.

Keywords: heating furnace, oxidation kinetics, mathematical model, blowing-down, optimum thermal mode.

Остановки работы прокатного стана оказывают непосредственное влияние на работу нагревательных печей, а именно вызывают их простои. При длительных простоях (20 мин и более) отсутствие перемещения заготовок в печи при неизменном температурном режиме приводит к перегреву металла и повышенному окислению.

Следует отметить, что в общем случае незапланированные простои печи сопровождаются избыточным расходом топлива, однако в данной работе критерием негативных последствий длительного простоя принята скорость окисления на поверхности нагреваемых заготовок.

Расчетные исследования особенностей теплового режима нагрева металла с учетом окисления проведены с использованием математической модели [1, 2] для следующих условий:

– настройка математической модели для базового режима (без простоев) осуществляется для условий нагрева стальных заготовок квадратного сечения (100×100 мм) в

печи двухстадийного нагрева с использованием результатов термометрирования заготовок [3];

– исследование окисления на поверхности нагреваемых заготовок выполнено в условиях повышенной температуры при простое печи длительностью 40 мин;

– в качестве способа снижения степени окисления используется подстуживание поверхности заготовок в период длительного простоя.

Объектом исследования выбрана заготовка под прокатку из кипящей стали СтЗкп сечением 100×100 мм и длиной 2,5 – 3,3 м, обрабатываемая в прямоточно-противоточной методической печи стана 250 Нижне-Сергинского металлургического завода (НСМЗ) с центральным отбором продуктов сжигания топлива [3]. Печь состоит из двух зон, разделенных дымоотводом, что позволяет осуществить двухстадийный малоокислительный нагрев заготовок при возможности эффективного регулирования тепловых режимов каждой зоны.

Определение поля температур в стальной заготовке при нагреве в методической печи состоит в численном решении уравнения [1, 2]

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad} T) + L(x, y, z, t) \quad (1)$$

с учетом начального условия $T(t_0) = T_n$ при $t = 0$, а также граничных условий на поверхности заготовки:

$$\pm \lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \alpha_k (T_{\text{пов}} - T_s) + \sigma_b (T_{\text{пов}}^4 - T_s^4), \quad (2)$$

где: T – температура, К; t – время, с; λ, ρ, C – коэффициенты теплопроводности, массовой плотности и удельной теплоемкости металла соответственно; L – объемная плотность источника тепла, сопровождающего протекание фазовых превращений, кДж/кг; σ_b – коэффициент теплообмена излучением, Вт/(м²·К⁴); α_k – коэффициент конвективной теплоотдачи на поверхность заготовки, Вт/(м²·К); T_s – температура окружающей среды, К; T_n – начальное значение температуры сляба, К; n – нормаль к поверхности сляба.

Для базового режима нагрева заготовок (без простоя печи) графики нагрева металла в трех представительных точках (рис. 1) совместно с принятым графиком изменения температуры греющей среды (T_v) приведены на рис. 2.

Влияние длительного незапланированного простоя на процессы нагрева металла иллюстрируются графиками изменения во времени температур, полученными при задании двух режимов изменения температуры греющей среды, соответствующих нагреву без подстуживания (рис. 3) и нагреву с подстуживанием поверхности заготовки (рис. 4).

Тепловой режим печи с подстуживанием характеризуется резким снижением температуры греющей среды в момент начала незапланированного простоя до уровня 820 °С, при котором на стадии простоя температура поверхности не превышает 770 °С, что обеспечивает существенное снижение интенсивности окалинообразования на этой стадии.

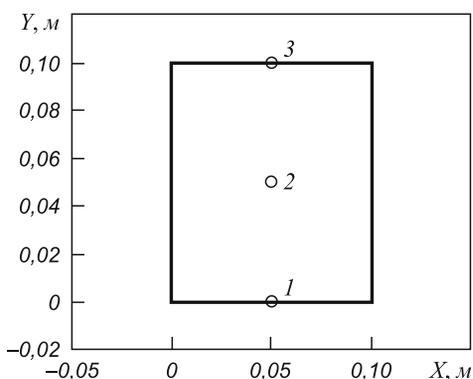


Рис. 1. Размещение контрольных точек в поперечном сечении заготовки

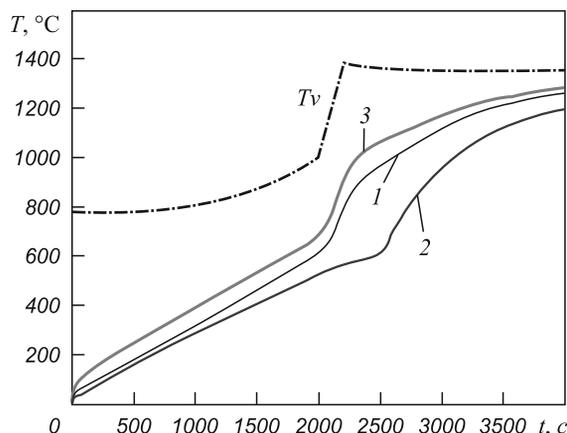


Рис. 2. Изменение во времени температуры металла и греющих газов при нагреве заготовки сечением 100×100 мм без простоя: T_v – температура продуктов сгорания; 1 – нижняя поверхность; 2 – центр; 3 – верхняя поверхность

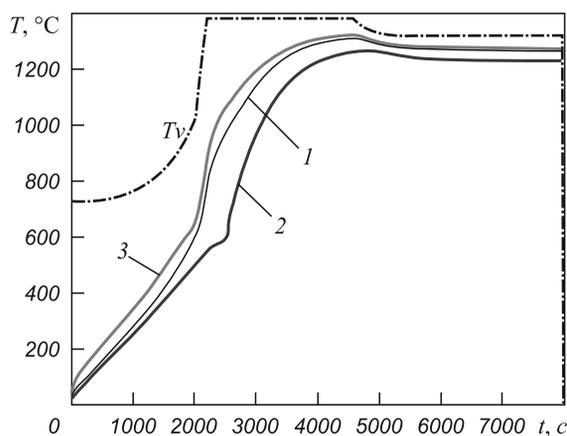


Рис. 3. Изменение во времени температуры греющей среды и температуры в представительных точках заготовки при длительном простое (40 мин) нагревательной печи, начиная с момента $t = 2000$ с: T_v – температура продуктов сгорания; 1 – нижняя поверхность; 2 – центр; 3 – верхняя поверхность

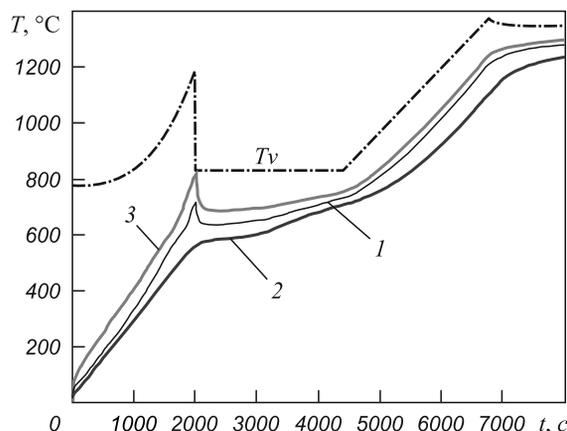


Рис. 4. Изменение во времени температуры греющей среды и температуры в представительных точках заготовки при длительном простое (40 мин) и управлении режимом нагрева путем подстуживания в период простоя: T_v – температура продуктов сгорания; 1 – нижняя поверхность; 2 – центр; 3 – верхняя поверхность

Обратимся к расчетной оценке окалинообразования на поверхности заготовки при различных режимах нагрева металла в печи двухстадийного нагрева.

Исследованию кинетики окисления стали при повышенных температурах посвящено большое число публикаций [4 – 7]. Считается доказанным, что зависимость скорости окисления от температуры подчиняется закону Аррениуса [8]

$$\frac{dm}{dt} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right), \quad (3)$$

где m – масса образующейся окалины, г; t – время, с; Q – энергия активации или разрыхления решетки оксида, Дж/кмоль; $R = 8,3143$ – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К); A – константа скорости окисления, г/(см²·мин^{0,5}).

В конкретных расчетах скорости окисления стали формула Аррениуса (3) преобразуется к виду дифференциального уравнения

$$\frac{dh}{dt} = \frac{K_0}{2h} \exp\left[-\frac{B}{T(t)}\right] \quad (4)$$

при соблюдении начального условия

$$h|_{t=t_0} = h_0 \quad (5)$$

где K_0 – константа, мм²/ч; $B = Q/R$ – константа, К; h – толщина слоя окалины, мм.

Табличные значения коэффициентов A и B для различных марок стали в широком объеме можно найти в литературе [9, 10].

Далее в рассмотрение вводится параметр

$$W = \frac{dh^2}{dt} = K_0 \exp\left(-\frac{B}{T}\right), \quad (6)$$

характеризующий интенсивность образования окалины (рис. 5), а интеграл дифференциального уравнения (4) приводится к виду

$$h_k^2 = K_0 \int_{t_0}^{t_k} \left\{ \exp\left[-\frac{B}{T_{\text{пов}}(t)}\right] \right\} dt. \quad (7)$$

Для определения численных значений толщины слоя окалины осуществим интегрирование в уравнении (7) при заданном графике изменения во времени температуры поверхности заготовки и извлекая квадратный корень из полученного значения h_k^2 , определим значение толщины слоя окалины к моменту завершения процесса нагрева металла в печи (h_k). В процессе интегрирования использованы эмпирические значения констант B и K_0 уравнения (7). По результатам исследования Шишкина–Кузнецовой [11] $K_0 = 0,503 \cdot 10^6$ мм²/ч, $B = 18\,000$ К.

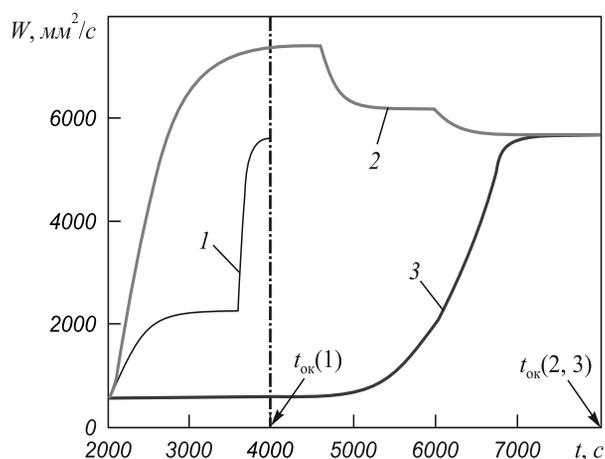


Рис. 5. Изменение во времени скорости окисления металла для трех режимов нагрева заготовки в прямоточно-противоточной печи (пояснения в тексте)

На рис. 5 представлены результаты численного (по формуле трапеций) определения интеграла в уравнении (7) для трех режимов нагрева заготовки в печи двухстадийного нагрева: для базового режима нагрева при отсутствии простоя печи (1), при учете простоя печи в течение 40 мин без подстуживания (2) и при нагреве заготовки с учетом простоя, но при подстуживании поверхности заготовки (3).

Результаты интегрирования приводят к следующим значениям средней по поверхности нагреваемой заготовки толщине слоя окалины:

- $h_1 = 0,532$ мм – для базового режима нагрева при отсутствии простоя печи;
- $h_2 = 1,416$ мм – при учете простоя печи в течение 40 мин без подстуживания;
- $h_3 = 0,827$ мм – при нагреве заготовки с учетом простоя, но при подстуживании поверхности заготовки.

Таким образом из расчетов следует, что использование подстуживания поверхности заготовки в период незапланированного простоя печи позволяет практически в два раза сократить толщину нарастающего на поверхности заготовки слоя окалины.

Выводы. Приведены результаты расчетных исследований с использованием математической модели по окалинообразованию во время простоя печи с металлом. Оценка угара металла на поверхности заготовки при ее нагреве в печи базируется на совместном решении уравнения теплопроводности и уравнения Аррениуса (скорость окисления). В результате определяется тепловой режим с уменьшенным угаром металла при незапланированных длительных простоях печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов Е.В., Дружинин Г.М. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 1. С. 52 – 55.
2. Попов Е.В., Дружинин Г.М. Адаптация математической модели расчета нагрева металла для АСУ на примере толкательной печи стана 2800 ОАО «Уральская сталь» // Первая

- всероссийская научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Теплофизика и информатика в образовании, науке и производстве» – Екатеринбург: УрФУ, 2012. С. 56 – 60.
3. Выбор режимов нагрева металла./ В.В. Быков, И.В. Франценок, Б.М. Хилков, Г.А. Щапов – М.: Металлургия, 1980. – 168 с.
 4. Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов. – М.: Машиностроение, 1962. – 856 с.
 5. Губинский В.И., Минаев А.Н., Тайц Н.Ю. // Защита металлов. 1967. Т. 3. № 2. С. 187 – 193.
 6. Губинский В.И., Минаев А.Н. Уменьшение окалинообразования при производстве проката. – Киев: Техника, 1981. – 135 с.
 7. Кузнецова Н.П., Колченко Г.И. // Изв. вуз. Черная металлургия. 1988. № 7. С. 123 – 126.
 8. Штиллер В. Уравнение Аррениуса и неравновесная кинетика. – М.: Мир, 2000. – 176 с.
 9. Темлянцев М.В., Михайленко Ю.Е. Окисление и обезуглероживание стали в процессах нагрева под обработку давлением. – М.: Теплотехник, 2006. – 200 с.
 10. Кубашевский О., Гопкинс Б. Окисление металлов и сплавов. – М.: Металлургия, 1965.
 11. Шишкин В.А., Кузнецова Н.П. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2007. № 5. С. 55 – 58.

© 2013 г. Г.М. Дружинин, Ю.А. Самойлович, Е.В. Попов
Поступила 15 января 2013 г.

УДК 621.315.573.311.3

О.А. Чикова¹, В.С. Цепелев¹, А.Н. Константинов², В.В. Вьюхин¹

¹Уральский федеральный университет

²Уральский государственный педагогический университет

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК МЕДИ НА ВЯЗКОСТЬ И МИРОРАССЛОЕНИЕ РАСПЛАВА ЖЕЛЕЗА

Аннотация. Проведено вискозиметрическое исследование расплавов Fe – Cu в режиме нагрева и последующего охлаждения образцов с содержанием меди от 0 до 10 % вес. По результатам измерений в надликвидусной части диаграммы состояний определены границы области существования в расплаве микронеоднородностей коллоидного масштаба.

Ключевые слова: сплав, выплавка, вязкость, микрогомогенизация.

EFFECT OF COPPER SUPPLEMENTATION ON VISCOSITY AND MICROSTRATIFIED OF MELTS IRON

Abstract. Fe – Cu melts have been studied by viscosimetry upon heating and subsequent cooling. Alloys containing 0; 0.5; 1.0; 3.0; 5.0; 10.0 % wt Cu. Based on the measurement results, the boundaries of the regions of microinhomogeneities in the melts are constructed in the phase diagram above the liquidus.

Keywords: alloy, melt, viscosity, microinhomogeneity.

Медь в сталях и чугунах является эффективным легирующим элементом. Она обеспечивает значительное упрочнение сплавов, повышает коррозионную стойкость, улучшает деформируемость сталей, влияет на антифрикционные свойства и износостойкость чугунов и графитизированных сталей, повышает прокаливаемость чугунов и сталей, существенно влияет на процессы кристаллизации и перекристаллизации в легированных сплавах [1]. В США была предложена сталь, в которой легирование Nb и V было заменено добавкой Cu. Формирующиеся при охлаждении наноразмерные, обогащенные медью частицы в α -Fe вызывают дисперсионное упрочнение стали, обеспечивают высокую пластичность и вязкость разрушения [2]. В то время как упрочняющий эффект преципитатов меди известен уже давно, механизм этого явления, а также факторы, контролирующие образование наноразмерных выделений меди остаются предметом дискуссий. Ярко выраженный эффект ОЦК-Cu выделений на механические свойства α -Fe стимулирует интерес

исследователей к изучению структурного состояния, термодинамических и упругих свойств твердых и жидких растворов Fe – Cu. Особый интерес вызывают факторы, определяющие условия их кристаллизации и связанные с явлением расслоения в сплавах Fe – Cu, а также особенности линий ликвидус в этой системе. Большое количество противоречивых данных относится к вопросу о смешиваемости Cu и Fe в жидком состоянии [3]. Диаграмма состояний системы Fe – Cu характеризуется наличием области несмешиваемости, которая появляется в переохлажденном расплаве (степень переохлаждения до 100 °С и выше); кривая расслоения сплавов системы Fe – Cu на две фазы, обогащенные соответственно железом и медью, располагается ниже кривой ликвидуса [4]. Сочетание методов ДТА, электронной микроскопии и микрорентгено-спектрального анализа позволило установить помимо метастабильного расслоения расплава с критической точкой 1704 К при $x_{Fe} = 0,53$ протекание метастабильного процесса кристаллизации $\delta \rightarrow \alpha$ в интервале со-