

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ РЕЖИМОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА*

Внедрение более экономичных режимов работы нагревательной печи, изменение марки нагреваемой стали вызывают перестройку работы печи. Сложность процессов теплообмена, происходящих в рабочем пространстве, обуславливает необходимость проведения экспериментальных и теоретических исследований условий нагрева заготовок. Объектом исследований стала нагревательная печь непрерывного мелкосортно-проволочного стана Белорусского металлургического завода.

Печь предназначена для нагрева заготовок из углеродистых низколегированных и конструкционных марок стали сечением 125×125 мм, длиной 12 м и массой до 1,4 т. Печь с шагающими балками и шагающим подом имеет семь зон автоматического регулирования теплового режима (рис. 1). В нагреваемых и томильных зонах на своде печи установлено 96 плоскофакельных горелок. В I и II зонах ниже уровня нагреваемых заготовок установлено шесть боковых длиннофакельных горелок. В качестве топлива применяется природный газ. В печи производится боковая загрузка и выдача заготовок. Температура заготовок на выходе из печи перед прокаткой составляет 1130...1200 °С. Для использования тепла уходящих из печи газов имеется рекуператор. Необходимый теплосъем с охлаждаемых элементов печи обеспечивается комбинированным способом (в балках используется испарительное охлаждение, в остальных элементах – водяное). Максимальная проектная производительность печи составляет 170 т/ч при тепловой мощности 69,62 мВт.

В литературе известен ряд подходов к решению задачи нестационарной теплопроводности в усложненной постановке с учетом нелинейности первого и второго рода в условиях сложного лучисто-конвективного теплообмена. Методы решения данной задачи описаны в [1–4]. Однако в связи с тем что в нагревательной печи БМЗ заготовки располагаются на расстоянии 200...400 мм одна от другой, в данной работе предложена двухмерная математическая модель, которая позволяет учесть зависимость теплофизических свойств сталей от температуры [5] и несимметричность нагрева заготовок в печи:

$$\rho(T)C(T) \frac{\partial T(x; y; \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T(x; y; \tau)}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T(x; y; \tau)}{\partial y} \right]; \quad (1)$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T(R; y; \tau)}{\partial x} = \sigma [T_c^4 - T^4(R; y; \tau)] + \alpha [T_c - T(R; y; \tau)];$$

*В работе приняли участие д-р техн. наук проф. Ю.А. Самойлович, канд-ты техн. наук В.И. Тимошпольский, Ю.А. Малевич.

$$\lambda(T) \frac{\partial T(x; R; \tau)}{\partial y} = \sigma [T_c^4 - T^4(x; R; \tau)] + a [T_c - T(x; R; \tau)]; \quad (3)$$

$$\frac{\partial T(0; y; \tau)}{\partial x} = 0; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T(x; 0; \tau)}{\partial y} = 0; \quad (5)$$

$$T(x; y; 0) = T_0 \quad (6)$$

где $-R \leq x \leq R$; $-R \leq y \leq R$; $0 \leq \tau < \infty$; C – теплоемкость; ρ – плотность; λ – теплопроводность; T_c – температура греющей среды; T_0 – начальная температура стали; R – характерный размер заготовки; a – коэффициент передачи тепла конвекцией; σ – приведенный коэффициент излучения системы газ–кладка–металл; x, y – система координат.

Решение задачи (1) ... (6) выполнено по неявной схеме методом конечных элементов.

Надежность и достоверность математического моделирования процесса нагрева металла контролируется на основе сравнения расчетных и экспериментальных данных. На рис. 2 приводится сопоставление расчетных и экспериментальных значений температур в характерных точках (верхняя и нижняя поверхности, центр) поперечного сечения заготовки при нагреве ее в нагревательной печи БМЗ.

Особенность температурных кривых – это характерное замедление скорости нагрева в области температур 720...800 °С, которое объясняется поглощением тепла при перлитном превращении в стали. Эта область характеризовалась максимальным (3 %) расхождением экспериментальных и расчетных данных, появляющимся вследствие разбивки общего времени нагрева на большие интервалы.

Эксперимент был проведен на действующем оборудовании, не оказывая влияния на технологический процесс. Непрерывнолитые заготовки подавались

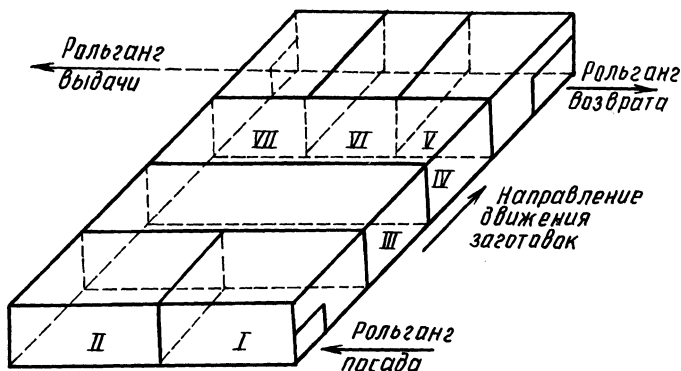


Рис. 1. Схема технологических зон нагревательной печи БМЗ:

I, II – нижние зоны подогрева; III – верхняя зона подогрева; IV – верхняя зона нагрева; V, VI, VII – зоны выравнивания.

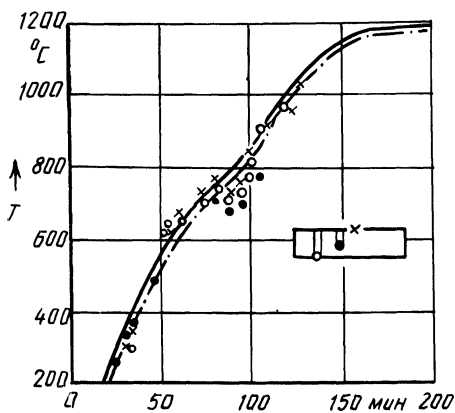


Рис. 2. Сопоставление расчетных значений температур с результатом экспериментальных измерений.

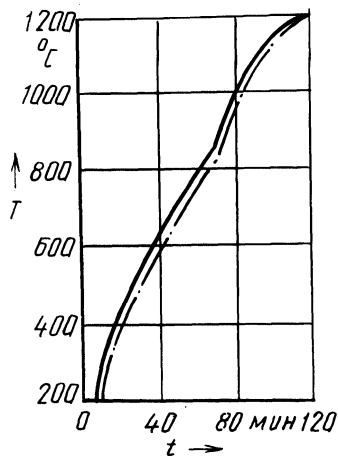


Рис. 3. Расчетный режим нагрева заготовок из стали 20 ГС при производительности печи 96 т/ч:

греющих газов; верхней поверхности заготовки; центра заготовки.

в печь из холодного посада. Равенство температур в зонах I и II, а также IV, V и VI позволило рассматривать эти зоны как единые методическую и томильную (рис. 1). Температуры в сечении заготовки замерялись хромель-алюмелевыми термопарами с диаметром термоэлектродов 1,2 мм. Термопары были защищены керамическими изоляторами. Для защиты от механических повреждений в начальной стадии эксперимента жгут проводов покрывался асбестом, а для защиты от мощных тепловых потоков плоскофакельных горелок — каолиновой ватой. Подготовленные таким образом термоэлектроды выводились через окно в торце печи со стороны посада заготовок и подключались к самопишущему потенциометру ЭПП-09, оттарированному по температурам кристаллизации химически чистых металлов (олово, цинк, медь). По мере продвижения экспериментальной заготовки жгут термоэлектродов подавался в печь по направляющим. В конце эксперимента он отключался от самописца и выдавался из установки по рольгангу возврата (рис. 1).

Разработанная двумерная математическая модель, надежность которой подтверждена результатами экспериментальных измерений, позволила проанализировать существующие и предложить более рациональные режимы нагрева стали.

В частности, на рис. 3 представлен режим нагрева заготовок из стали 20 ГС под прокат арматуры 14 (производительность печи 96 т/ч), разработанный с помощью математического моделирования на ЭЦВМ ЕС-1035. Ступенчатый график нагрева характеризуется постепенным наращиванием температур в зонах подогрева (I...III) и скоростным нагревом в зонах IV...VII. Осуществление нагрева по предложенному режиму, который обеспечивает сокращение времени пребывания заготовки при высоких температурах, ведет к уменьшению пе-

репада температур по сечению заготовки, а также снижению окислительно-обжаривания и обезуглероживания стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Саломатов В.В., Торлопов А.А. Лучисто-конвективный нагрев "тонких" тел с учетом переменной теплофизических характеристик // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1967. – № 8. – С. 139–141. 2. Бровкин Л.А., Крылова Л.С. К моделированию температурных полей тел с переменными коэффициентами // Изв. вузов СССР. Черная металлургия. – 1984. – № 1. – С. 149–152. 3. Лыков А.В. Методы решения нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1970. – № 5. – С. 109–150. 4. Способы расчета лучистого нагрева массивных тел / В.И. Тимошпольский, Ю.А. Малевич, Д.Г. Семяко и др. ВИНТИ № 5988-85. Деп. 5. Физические свойства сталей и сплавов, применяемых в энергетике / Под ред. Б.Е. Неймарк. – М.; Л.: Энергия, 1967. – 239 с.

УДК 669.017.3:681.5.01

И.А. КИЛИМНИК, Ю.А. МАЛЕВИЧ, канд. техн. наук (БПИ),
Ю.А. САМОЙЛОВИЧ, д-р техн. наук (ВНИИМТ)

УРАВНЕНИЯ ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА В ДВУХФАЗНОЙ ЗОНЕ ЗАТВЕРДЕВАЮЩЕГО СЛИТКА

При затвердевании промышленных стальных слитков образуется масса дендритных (древовидных) кристаллитов, смесь которых с маточным расплавом представляет собой двухфазную зону, полностью отделяющую отвердевшую часть слитка (твердую корку) от его жидкого ядра. Двухфазная зона слитка – это капиллярно-пористая среда с диаметром каналов между дендритными ветвями от десятых долей миллиметра до нескольких миллиметров.

Предполагается, что маточный расплав перемещается среди дендритных ветвей со скоростями, значительно превышающими скорость молекулярной диффузии. Главным признаком достаточно интенсивного движения жидкости в двухфазной зоне является наличие в полностью отвердевшем и остывшем слитке макроскопических зон химической неоднородности, к которым относятся скопления сульфидов железа, избыточное содержание основных компонентов стали, т. е. углерода, хрома, кремния. Несложные подсчеты показывают, что формирование макроскопических зон химической неоднородности путем молекулярной диффузии происходит за время, в десятки тысяч раз превышающее время затвердевания слитков. Поэтому основной причиной возникновения зональной сегрегации в непрерывных слитках следует считать конвективную диффузию примесей и легирующих компонентов сплава, обусловленную в свою очередь перемещением жидких масс в междендритном пространстве. Такое перемещение жидкости основывается на перепадах давления на разных участках двухфазной зоны. Неоднородность поля давления в двухфазной зоне слитка вызывается следующими причинами:

- 1) механическим воздействием на слиток механизмов литейной машины (например, опорных роликов в машине непрерывного литья стали);
- 2) газовой выделением внутри двухфазной зоны, что наиболее характерно для затвердевающих слитков кипящей стали;