

© И.С. Бугрин, М.А. Денисов, К.Г. Соловьев, 2012 г.  
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»  
г. Екатеринбург  
*bugrin@rambler.ru*

## **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПАКЕТА ANSYS**

Обычно математические модели технологических процессов разрабатываются специалистами полностью самостоятельно. Программы получаются сложные, эффективно использовать их могут только авторы. Современные вычислительные технологии позволяют резко ускорить разработку новых сложных моделей за счет использования унифицированных алгоритмических блоков. Программы, разработанные на основе такого подхода, более удобны для широкого применения.

В данной работе для использования современных вычислительных средств, промышленная нагревательная печь представлена как совокупность зон теплообмена: зоны внешнего теплообмена в объеме газа, ограниченном кладкой, и зоны внутреннего теплообмена в объеме нагреваемого металла. Решение такой задачи представляет собой задачу сопряженного теплообмена, требующую задания условий на границе зон. Если на границе задается распределение во времени температуры, это условие полностью определяет процесс теплопереноса в непрозрачном металле. Поэтому задача внутреннего теплообмена решается с использованием программного комплекса ANSYS Multiphysics.

Задачу внешнего теплообмена удобно описывать с использованием известного аналитического решения В.Н. Тимофеева, рассматривающего камеру печи как совокупность объемной зоны газа и поверхностных зон кладки и металла [1]. Данное решение получено с использованием ряда допущений (приближение «серого» газа и др.), поэтому используются поправочные коэффициенты, определяемые отдельным расчетом.

В ANSYS отсутствуют эффективные методы решения теплофизических задач, моделирующих процессы фазовых превращений с движущимися границами фаз. Метод эквивалентной теплопроводности для расчета нагрева тел с меняющимися размерами, расширяющий возможности известных математических программных комплексов по моделированию таких процессов, предложен в работе [2]. В данной работе метод используется для описания нагрева металла, сопровождающегося окислением металла атмосферой печи.

Заготовка нагреваемого металла представлена как совокупность зоны металла и зоны окалины, в которых заданы соответствующие

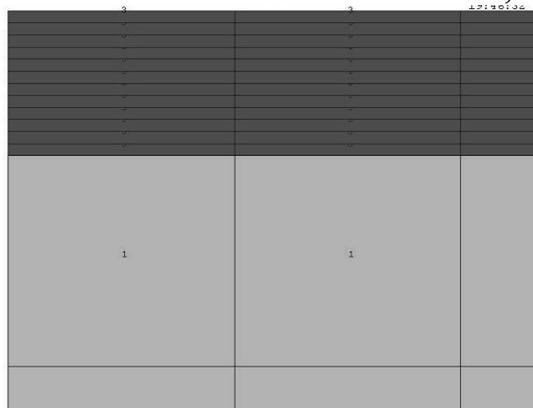


Рис. 1. Фрагмент конечно-элементного разбиения пластины (заготовки) при моделировании нагрева и окисления металла (вверху слой окалины, внизу металл)

температуре материалов свойства. Обе зоны имеют независимое конечно-элементное разбиение, показанное на рис. 1. Задача решается в ANSYS

Multiphysics при граничных условиях I рода. При этом температуры на поверхностях металла задаются таблицей значений во времени.

В целом, математическая модель для расчетного определения рациональных тепловых

режимов (рецептов) нагрева металла рассматривается как комбинация огневых камер, содержащих «свод», «металл» и изотермическую объемную зону. Например, в толкательной методической печи на каждом расчетном участке по ее длине имеется огневая камера над металлом и камера под металлом (рис. 2). У камеры над металлом «свод» – это совокупная поверхность свода и боковых стен. «Металл» – верхняя поверхность заготовок (в печах других конструкций это условная поверхность, проходящая через верхние поверхности заготовок). В нижней сварочной зоне учитывается наличие потерь тепла к охлаждаемым опорным трубам печи.

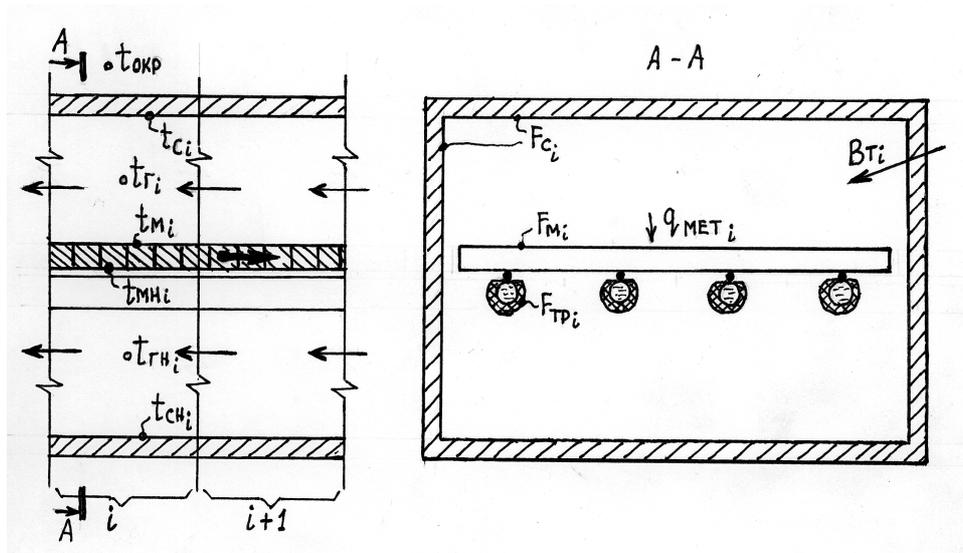


Рис. 2. Расчетная схема толкательной методической печи

В такой постановке для толкательных печей уравнения баланса тепла имеют вид:

для поверхности «свода» камеры

$$\chi_{C.i}(t_{C.i} - t_{OKP}) = \alpha_{Ki}^C(t_{Gi} - t_{Ci}) + q_{PEZ.LC.i}, \quad (1)$$

для поверхности «металла»

$$q_{MET.i} = \alpha_{Ki}^M(t_{Gi} - t_{Mi}) + q_{PEZ.LM.i}, \quad (2)$$

для объемной зоны продуктов горения

$$\begin{aligned} B_{Ti}Q_H^P + B_{Ti}c_T t_T + B_{Ti}L_\alpha c_B t_B - B_{T.i}V_\alpha c_{G.i}t_{G.i} + B_{БАЛ.i+1}(c_{G.i+1}t_{G.i+1} - \\ - c_{G.i}t_{G.i}) - B_{ПОДС.i}(c_{B.t.Gi}t_{Gi} - c_{B.t.окр}t_{OKP}) = \chi_{C.i}(t_{C.i} - t_{OKP})F_{Ci} + \\ + (q_{MET.i} + q_{MET.i}^{НИЗ})F_{Mi} + K_{TP.i}\chi_{TP.i}(T_{G.i} - T_{ВОДЫ})F_{TP.i}. \end{aligned} \quad (3)$$

В выражениях (1)–(3):  $t_{Gi}$ ,  $t_{Cb}$ ,  $t_{Mi}$  – средние температуры продуктов горения, «свода» и «металла», соответственно;  $q_{MET.i}$  – суммарный поток тепла, поглощенного верхними поверхностями металла;  $q_{MET.i}^{НИЗ}$  – суммарный поток тепла, поглощенного нижними поверхностями заготовок (в толкательных печах и печах с шагающими балками  $q_{MET.i}^{НИЗ} = 0$ );  $F_{M.i}$ ,  $F_{Cb}$ ,  $F_{TP.i}$  – поверхности ряда заготовок, свода и опорных труб, приходящиеся на длину расчетного участка  $i$ ;  $K_{TP.i}$  – поправочный коэффициент;  $B_{Ti}$  – расход топлива на длине участка  $i$ ;  $Q_H^P$  – теплота горения топлива;  $t_T$ ,  $t_B$  – температура подогрева топлива и воздуха, соответственно;  $c_T$ ,  $c_G$ ,  $c_B$  – теплоемкости топлива, дымового газа и воздуха;  $L_\alpha$ ,  $V_\alpha$  – объем воздуха, необходимый для сжигания  $1 \text{ м}^3$  топлива, и получающийся при этом объем

продуктов горения при заданном коэффициенте расхода воздуха  $\alpha$ ;  $\alpha_{Ki}^M$ ,  $\alpha_{Ki}^C$  – коэффициенты теплоотдачи конвекцией к поверхностям металла и свода;  $V_{БАЛ.i+1}$ ,  $V_{ПОДСi}$  – расходы газа, поступающего с участка  $i+1$ , и воздуха, подсасываемого в печь на участке  $i$ ;  $\chi_{Сi}$ ,  $\chi_{ТР.i}$  – коэффициенты теплопередачи через кладку свода и изоляцию труб;  $q_{РЕЗ.ЛСi}$ ,  $q_{РЕЗ.ЛМi}$  – результирующие тепловые потоки излучения на свод и металл. В верхних сварочных зонах задается  $F_{ТР.i} = 0$ . Для расчета печей иных типов запись выражений (1)–(3) корректируется. В разработанной математической модели величины  $q_{РЕЗ.ЛСi}$  и  $q_{РЕЗ.ЛМi}$  определяются по формулам В.Н. Тимофеева, величина  $q_{МЕТ.i}$  и  $q_{МЕТ.i}^{НИЗ}$  определяются в процессе решения внутренней задачи в ANSYS Multiphysics.

Решение задачи сводится к последовательному использованию вычислительного программного комплекса ANSYS Multiphysics и математического пакета MathCAD. В ANSYS определяется поле температуры в трехмерных заготовках металла. Учитывается, что в печах с механизированным подом заготовки расположены на поду на расстоянии друг от друга, а в толкательных печах укладка металла сплошная. На поверхностях модели заготовок размещается слой окалины, меняющейся во времени толщины. Программа в MathCAD решает задачу теплообмена излучением в камере, определяет распределения температуры и расхода топлива по длине печи. По алгоритму из работы [3] определяются рациональные режимы (рецепты) нагрева металла.

Разработанные методы исследования тепловой работы прошли апробацию при проведении исследований на печи с шагающим подом № 3 НСММЗ.

#### Список использованных источников

1. Тимофеев В.Н. Теплообмен в мартеновских печах // Повышение экономичности и производительности нагревательных и мартеновских печей : сб. науч.-исслед. работ УОВТИ. М.: Metallurgizdat, 1940.

2. Денисов М.А., Бугрин И.С. Метод эквивалентной теплопроводности для расчета нагрева тел с размерами, меняющимися при фазовых превращениях // Теплофизические основы энергетических технологий : сб. трудов Всерос. науч.-практ. конф. / Национ. исслед. Томский политех. ун-т. Томск: Изд-во ТПУ, 2010. С. 78–82.

3. Денисов М.А., Соловьев К.Г. Расчетно-экспериментальный метод исследования нагрева металла и выбора режимов // Сталь. 2010. № 2. С. 90–95.