

УДК 621.742.42:536.212.3.022

О.А. Бройтман (6 курс, каф. ФХЛСиП), В.М. Голод, к.т.н., проф.

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ФАКТОРОВ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Перенос тепла в литейной форме, являющейся капиллярно-пористым телом, определяется одновременным вкладом кондуктивной, конвективной и лучистой составляющей теплового потока. Для такой системы, как формовочная смесь, возможно управление её свойствами путём изменения объёмных долей компонентов и степени уплотнения, т.е. при воздействии на структуру смеси. В работе поставлена задача определения эффективных теплофизических характеристик формовочных смесей путём построения детерминированной математической модели, опирающейся на представления о структуре смеси, зависящей от внешних воздействий и учитывающей различные механизмы переноса тепла.

Первоначально полученная структурная модель зернистой системы [1] была дополнена элементами, приближающими её к описанию структуры реальной формовочной смеси. Смесь отождествляется с совокупностью агрегатов, представляющих собой в первом приближении зерно наполнителя в комплексе с плёнкой связующего (структура песчано-глинистой смеси). Расчёт теплопроводности смеси основан на разбиении теплового потока в указанной системе на отдельные трубки тока с последующим установлением теплового сопротивления трубки тока, равного сумме тепловых сопротивлений её элементов. Схема нахождения тепловых сопротивлений базируется на осреднении геометрических параметров элементов.

Привлечение модели фиктивной смеси, построенной из одинаковых шарообразных частиц, уложенных в упаковку, плотность которой изменяется путём задания угла ромбоэдра θ , образуемого при соединении центров восьми соприкасающихся шаров, позволило ввести в описанную выше структурную модель определение рыхлоты упаковки агрегатов. При этом пористость смеси лежит в интервале от 0,26 ($\theta = 60^\circ$) до 0,48 ($\theta = 90^\circ$).

Расчёт теплопроводности при различных углах θ укладки агрегатов показал (рис. 1), что проводимость рассматриваемой системы повышается при увеличении температуры, причём темп роста существенно повышается в области температур, при которых значителен лучистый перенос в порах смеси (более 1100°C). Проводимость рыхлой смеси ($\theta = 90^\circ$) примерно на 40% ниже проводимости плотноупакованной ($\theta = 60^\circ$), т.к. при этом понижается объёмная доля агрегатов, обладающих более высокой теплопроводностью. При одной и той же пористости смеси большие значения эффективного коэффициента теплопроводности отмечаются у смесей, образованных агрегатами, имеющими большие размеры, т.к. при этом увеличиваются размеры пор и усиливается лучистая составляющая теплового потока, а также снижается тепловое сопротивление агрегата.

На следующем шаге в работе проведено исследование неравномерного прогрева литейной формы при учёте сложного характера изменения теплопроводности в зависимости от температуры, исследованного вышеописанными методами. Расчёты производились для полу бесконечной формы на основе численного решения уравнения Фурье

$$c(T)\rho(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right], \quad (1)$$

где τ – время; x – координата; T – текущая температура; $c(T)$, $\rho(T)$ – температурнозависимые соответственно теплоёмкость и плотность смеси; $\lambda(T)$ – теплопроводность, зависящая от структуры смеси и комплекса внешних воздействий (температура, давление и т.д.). Характеристики $c(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ рассчитывали для тонкого слоя, соответствующего величине шага по оси x , в пределах которого температура может считаться неизменной. Краевые условия:

$$T(0, \tau) = T_n = const; \quad T(x, 0) = T_o; \quad \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=s} = T_o, \quad (2)$$

где T_o и T_n – соответственно начальная и поверхностная температуры формы; s – координата точки, значительно удалённой вглубь формы.

Значения, принимаемые нелинейными функциями $c(T)$ и $\rho(T)$, находили по аддитивным формулам, учитывающим концентрацию компонентов в смеси, используя известные термодинамические уравнения для теплоёмкости и плотности компонентов.

По результатам решения уравнения (1) независимым путём определяли эффективные теплофизические свойства формы, учитывающие суммарный вклад всех механизмов теплопроводности, т. е. влияние прогретых в большей или меньшей степени слоёв формы ($a_{\text{эф}}$ – эффективная температуропроводность, $b_{\text{эф}}$ – эффективная тепловая активность, $c_{\text{эф}}$ – эффективная теплоёмкость, $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность) по формулам:

$$a_{\text{эф}} = \frac{(T_n - T_o)^2}{\pi \tau \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}^2}; \quad b_{\text{эф}} = \frac{\sqrt{\pi} \int_0^s c(T)(T - T_o) dx}{2(T_n - T_o)\sqrt{\tau}}; \quad c_{\text{эф}} = \frac{\int_0^s c(T)(T - T_o) dx}{\int_0^s (T - T_o) dx}; \quad \lambda_{\text{эф}} = \frac{q_{\phi}}{\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0}} \quad (3)$$

Здесь выражение для $a_{\text{эф}}$ получено путём дифференцирования уравнения для температурного поля формы, описываемого с помощью функции Гаусса:

$$T = (T_n - T_o) \operatorname{erfc} \frac{x}{2\sqrt{a_{\text{эф}} \tau}}; \quad \text{для } b_{\text{эф}} - \text{ из условия равенства количества тепла } Q_{\phi}, \text{ поглощённого}$$

формой, определяемого, с одной стороны, интегральной суммой теплосодержания отдельных участков, с другой – расчётной формулой

$$\text{теории теплопроводности } Q_{\phi} = \frac{2(T_n - T_o)}{\sqrt{\pi}} b_{\text{эф}} \sqrt{\tau};$$

для $c_{\text{эф}}$ – исходя из физического смысла удельной теплоёмкости и условия $c_{\text{эф}} = const$; для $\lambda_{\text{эф}}$ – из закона Фурье (q_{ϕ} – тепловой поток в форме).

Проведённые расчёты показали, что в процессе прогрева формы значения всех эффективных теплофизических характеристик остаются практически неизменными, за исключением кратковременного начального этапа. Характерно, что величина эффективных теплофизических характеристик зависит от интенсивности изменения значений $\lambda(T)$ и $c(T)$.

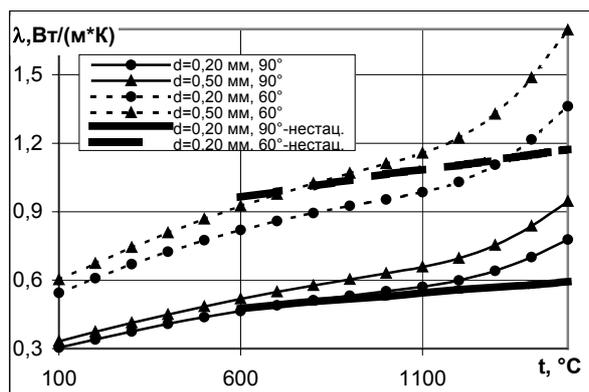


Рис.1. Результаты расчёта эффективного коэффициента теплопроводности

На рис.1 сведены результаты решения описанной нестационарной задачи переноса тепла при задании различных значений поверхностной температуры формы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бройтман О.А., Голод В.М. Определение теплофизических характеристик формовочных материалов на основе моделирования их дисперсной структуры и переноса тепла кондукцией, конвекцией и лучеиспусканием // Сб. Литейное производство сегодня и завтра. Тезисы докладов, посвящённых 70-летию кафедры «Физико-химия литейных сплавов и процессов» и 100-летию со дня рождения основателя кафедры проф., д.т.н. Ю.А. Нехендзи. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 148-150.