

МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА В ДИСПЕРСНЫХ ФОРМОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛАХ ДЛЯ ПРОГНОЗА ИХ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ

О.А. Бройтман

При использовании систем компьютерного моделирования литейных процессов часто встаёт вопрос об информационном обеспечении теплофизическими характеристиками формовочных материалов, применяемых при изготовлении подлежащей моделированию отливки. Обычно препроцессор моделирующей системы предполагает ввод температурно-зависимых значений удельной теплопроводности и объёмной теплоёмкости.

Проблему обеспечения этими свойствами смесей можно рассматривать на двух уровнях. Приняв в первом приближении поверхностный подход к решению задачи, заключающийся лишь в поиске необходимых данных в литературных источниках, велика вероятность столкнуться с тем, что теплофизические свойства для многих смесей никогда не определялись экспериментально. Это распространённая ситуация, учитывая многообразие рецептур смесей.

В случае, если свойства удалось обнаружить, следует говорить лишь о наличии приближённых данных, поскольку особенности рецептуры, зерновой состав, степень уплотнения, химический состав компонентов применяемой на практике смеси практически всегда будут отличаться от ранее исследованной. Это обстоятельство подтверждает также разноречивость литературных данных (см., например, [1-3]). Отсюда вытекает следующий уровень рассмотрения проблемы: раз и навсегда заранее определённых свойств для различных типов смесей не существует, для моделирования формирования отливок с высокой точностью следует в условиях конкретно взятого литейного производства производить эксперименты по установлению теплофизических характеристик литейных форм. Однако, в производственных условиях такие мероприятия трудноосуществимы, не любой экспериментальный метод обеспечивает получения характеристик, пригодных для ввода в систему моделирования.

В целом невозможность проведения экспериментов ни в коем случае не может являться причиной отказа от использования компьютерного моделирования. Расчёты могут производиться и с использованием приближённых характеристик, при условии знания метода их экспериментального определения и того, насколько математический аппарат этого метода согласуется с заложенными в моделирующую систему моделями тепловых процессов, протекающих в отливке и форме. В ряде случаев есть возможность произвести такую математическую обработку экспериментальных данных, которая позволит получить корректные значения теплофизических характеристик, пригодные для ввода в систему моделирования [4]. В крайнем случае, моделирующая система всегда предоставляет свободу в проведении вычислительных экспериментов, в рамках которых возможно варьировать свойства в разумных пределах, а затем соотносить результаты расчётов с результатами заливок реальных отливок.

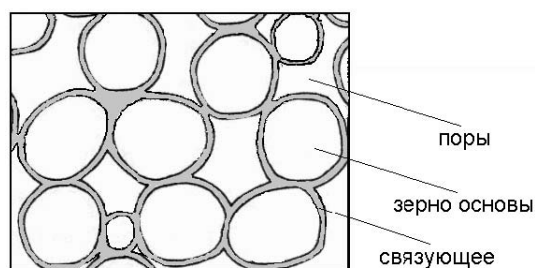


Рис. 1. Схема структуры формовочного материала

Радикальным же путём создания информационного обеспечения и повышения точности вводимых в систему данных о теплофизических характеристиках следует признать экономичный путь их расчётного установления [5] по заданному составу и параметрам структуры смеси. В основу расчётного метода были положены математические модели, описывающие дисперсную структуру формовочной смеси (рис. 1) и механизмы распространения тепла в ней (кондукция, лучеиспускание и конвекция).

При использовании подхода Г.Н. Дульнева [6] разработали модель структуры осреднённого элемента уплотнённой формовочной смеси, представляющего собой зерно основы радиуса r_n с оболочкой связующего толщиной от δ_0 до δ (рис. 2,а). Для расчёта эффективной теплопроводности дисперсного материала широко используется принцип обобщённой проводимости [6-8]. С учётом этого принципа теплопроводность цилиндрической ячейки радиуса r_1 (рис. 2,а) с осреднёнными геометрическими параметрами определяется термическими сопротивлениями (рис.2,б) отдельных его участков. Теплопроводность цилиндрической ячейки радиуса r_1 (рис. 2,а) с осреднёнными геометрическими параметрами определяется термическими сопротивлениями (рис.2,б) отдельных его участков. Тепловой поток, входящий в нижнее основание ячейки, преодолевает термическое сопротивление прослойки связующего R_1 , далее переходит в зерно наполнителя и распределяется по нему (термическое сопротивление R_2). Параллельно с этим входящий тепло-вой поток встречает сопротивление R_3 воздушного зазора и части ячейки под изотермой AB , ограниченного справа адиабатой CB . После прохождения через участок с сопротивлением R_3 тепловой поток распространяется в зерне наполнителя (сопротивление R_4) и параллельно с этим в плёнке связующего (R_5). В дополнение со всеми описанными путями происходит перенос тепла в сквозных воздушных порах (R_6). Для суммарного термического сопротивления R всего осреднённого элемента, выражаемого через искомую эффективную теплопроводность ячейки λ_k , относительную деформацию каркаса формовочного материала χ_k , находимую по известной деформации связующего после уплотнения χ_{cb} , и исходный радиус зерна в оболочке связующего (до уплотнения) r получено соотношение:

$$R = \frac{r(1-\chi_{\kappa})}{\lambda_{\kappa} \pi r_1^2}, \quad (1)$$

откуда с учётом схемы соединения термических сопротивлений (рис. 2,б) следует выражение для определения эффективной теплопроводности ячейки:

$$\lambda_{\kappa} = \frac{r(1-\chi_{\kappa}) \left(1/(R_1 + R_2) + 1/\left(R_3 + \frac{R_4 R_5}{R_4 + R_5} \right) + 1/R_6 \right)}{\pi r_1^2}. \quad (2)$$

Способ расчёта сопротивлений $R_1 \div R_6$ зависит от характера среды, в которой распространяется тепло. Прогноз эффективной объёмной теплоёмкости c формовочного материала с удовлетворительной точностью выполняется на основе правила аддитивности.

На рис. 3 приведены результаты расчётного исследования температурных зависимостей эффективной теплопроводности уплотнённых формовочных материалов различной структуры. Полученные данные свидетельствуют о преимущественном росте эффективной теплопроводности песчано-глинистых смесей с повышением температуры. Причина резкого усиления темпа роста в области высоких температур – увеличение лучистой составляющей теплообмена в порах в сочетании со слабым возрастанием истинной теплопроводности зёрен кварцевой основы выше 1000°C (рис. 3). Показано, что чем меньше размер зёрен, тем в большей степени выражено падение эффективной теплопроводности в интервале температур $20^{\circ}\text{C} - 500^{\circ}\text{C}$, что находится в соответствии с понижением истинной теплопроводности кварца и соответствует экспериментальным исследованиям. Толщина плёнки связующего уменьшается при понижении размера зерна (смесь характеризуется более развитой эффективной поверхностью) в условиях сохранения неизменной массовой доли связующего C_{cb} ; с увеличением C_{cb} в смеси увеличиваются размеры площадок контакта агрегатов. В каждом из указанных случаев понижается тепловое сопротивление зоны контакта и усиливается влияние истинных свойств зерновой основы на ход кривой изменения эффективной теплопроводности.

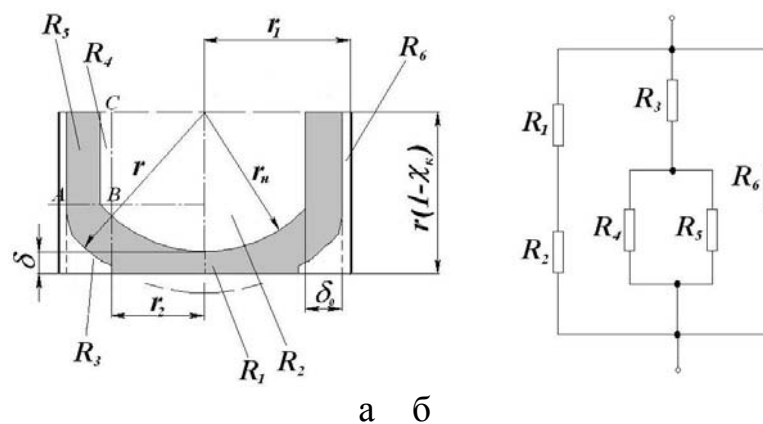


Рис. 2. Модель ячейки структуры уплотнённого формовочного материала
а – схема ячейки структуры; б – схема соединения термических сопротивлений

Уплотнение смеси, соответственно, повышение её эффективной плотности ρ и увеличение количества связующего в смеси приводит к увеличению площадок контакта агрегатов и к закономерному увеличению эффективной теплопроводности. Добавка к наполнителю более теплопроводного связующего радикальным образом не сказывается на повышении эффективной теплопроводности смеси, что подтверждено рядом вычислительных экспериментов на модели при варьировании свойств связующего в широком интервале. Толщина плёнки всегда мала в сравнении с размерами зёрен и по этой причине тепловое сопротивление собственно связующего не является лимитирующим звеном. Именно размер площадок контакта является решающим фактором, влияющим на эффективную теплопроводность смеси.

Приведённые на рис. 3 опытные значения λ для различных смесей [9] согласуются с результатами моделирования. Для найденных на основе модельных представлений о переносе тепла в ячейке зернистого тела при стационарных условиях значений λ и c далее принято общее обозначение – *локально-эффективные* теплофизические характеристики. Совокупность этих характеристик для различных формовочных материалов является исходным компонентом информационного обеспечения систем моделирования тепловых процессов при литье.

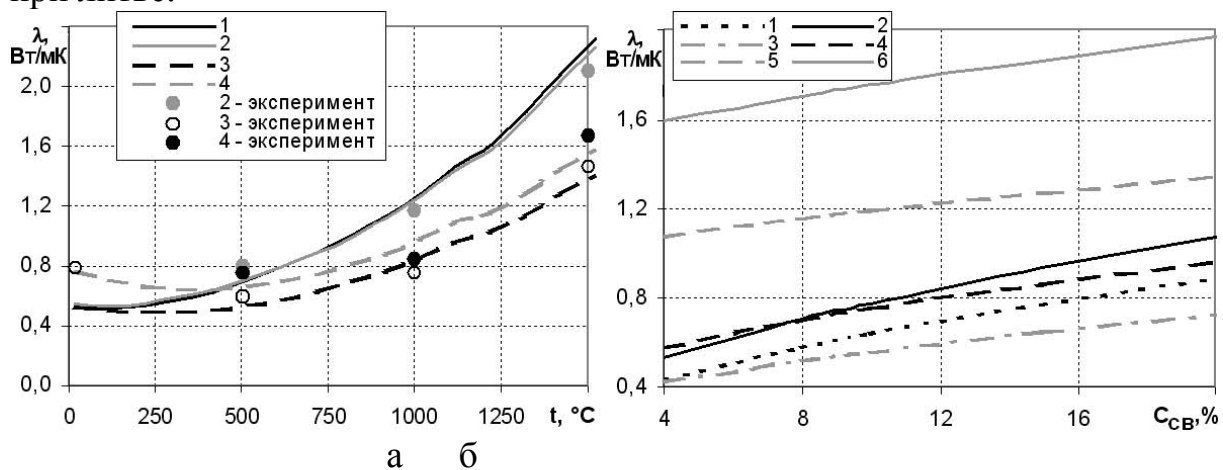


Рис. 3. Влияние температуры (а) и количества связующего (б) на эффективную теплопроводность уплотнённых песчано-глинистых смесей по результатам моделирования (линии) и опытным данным (точки)

- а: 1 и 2 – $d_n = 0,5$ мм, $C_{св} = 4\%$, для 1 – $\rho = 1556$ кг/м³, для 2 – $\rho = 1605$ кг/м³;
 3 и 4 – $d_n = 0,2$ мм, $\rho = 1605$ кг/м³; для 3 – $C_{св} = 4\%$, для 4 – $C_{св} = 10\%$;
 б: 1 – $d_n = 0,2$ мм, $t = 20^\circ\text{C}$; 2 – $d_n = 0,5$ мм, $t = 20^\circ\text{C}$; 3 – $d_n = 0,2$ мм, $t = 300^\circ\text{C}$;
 4 – $d_n = 0,5$ мм, $t = 300^\circ\text{C}$; 5 – $d_n = 0,2$ мм, $t = 1200^\circ\text{C}$; 6 – $d_n = 0,5$ мм, $t = 1200^\circ\text{C}$

Численное исследование нестационарного (неравномерного) прогрева литейной формы на основании решения уравнения Фурье при задании локально-эффективных структурно- и температурно-зависимых теплофизических параметров λ и c позволяет определить *интегрально-эффективные* теплофизиче-

ские свойства формовочных материалов (теплопроводность $\lambda_{эф}$, теплоёмкость $c_{эф}$, температуропроводность $a_{эф}$ и тепловую активность $b_{эф}$), учитывающие различную степень прогрева участков формы и изменения структуры материала этих участков в результате термодеструкции связующего, испарения влаги и т.д. [10]. Именно интегрально-эффективные теплофизические характеристики формовочного материала используются при аналитическом решении задачи о прогреве литейной формы. Численным расчетом показана стабилизация во времени интегрально-эффективных теплофизических характеристик литейной формы на разном уровне для разных температур заливки, зернового состава и свойств материала-основы смеси [10]. Посредством вычислительных экспериментов выявили наличие зависимости интегрально-эффективных теплофизических свойств от конфигурации границы раздела отливка-форма, что влечёт за собой вывод о неправомерности использования интегрально-эффективных свойств, заданные постоянными для всего объёма формы, при расчётах затвердевания фасонных отливок. Универсальным путём точного учёта теплоотвода в форму при численных расчётах является использование локально-эффективных свойств её материала.

Однако, здесь следует обратить внимание на своего рода непригодность существующих на рынке программного обеспечения систем моделирования литейных процессов к точному решению задачи теплообмена в литейной форме, изготовленной из любого материала. Использование при тепловых расчётах температурно-зависимых локально-эффективных свойств формовочного материала корректно при условии стабильности структуры смеси во времени при изменении температуры. В том случае, если нагрев смеси сопровождается превращениями в её компонентах и фазовый переход протекает в течение некоторого времени, что, в частности, происходит в случае термодеструкции смоляного связующего литейной формы, то нестабильность структуры будет определяться не только температурой T , но и временем τ нахождения участка смеси при данной температуре, от которого зависит степень превращения органического материала. Отсюда следует, что при задании теплофизических свойств песчано-смоляных смесей необходимо вводить ещё один параметр состояния материала смеси – время. Однако, в этом случае непрерывная кривая для зависимости свойств от температуры, требуемая к вводу в системе моделирования, распадается на множество кривых, отображающих значение теплофизической характеристики и соответствующих разным моментам времени. Для точного учёта изменения свойств при прогреве требуется при моделировании затвердевания отливки совместно с уравнением Фурье решать уравнение, описывающее химическую реакцию разложения смоляного связующего [11]. В то же время подлежит проверке вопрос о том, насколько существенен вклад «временной» составляющей процесса термодеструкции смолы и не является ли эта составляющая процесса быстрой в сравнении с вкладом «температурной» составляющей.

Исследовали нестационарную газификацию фенольно-фуранового связующего (температура начала деструкции 330°C) при прогреве литейной формы после заливки расплава, и выявляли, на какие механизмы переноса тепла

оказывает существенное влияние это превращение в песчано-смоляной смеси. Для этого производили расчёт изменения температур в форме путём численного решения уравнения Фурье, которое записывали в виде $c(T) \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + L \rho(T) \frac{\partial \gamma}{\partial \tau}$, где x – координата, отсчитываемая от поверхности формы; L – тепловой эффект превращения; γ – степень превращения, находящаяся из термо-кинетических уравнений [11].

Наличие в формовочном материале смоляного связующего существенно сказывается на газовом режиме литейной формы и интенсифицирует конвективный теплоперенос, поэтому одновременно с расчётом по уравнению Фурье определяли поле давлений в теле формы путём численного решения уравнения, полученного из уравнения неразрывности, уравнения Дарси и газового уравнения состояния [12].

Параллельно исследовали конвекцию в сухой негасотворной форме, когда транспорт газа вызван тепловым расширением воздуха, заполняющего поры смеси. Расчёты показали, что при литье в негасотворную форму конвективная составляющая переноса тепла выражена весьма слабо и определённо может не учитываться при расчетах тепловых условий затвердевания отливок. В случае литья в песчано-смоляную форму давление в порах смеси на несколько порядков превышает давление при литье в негасотворную форму и это может стать причиной брака отливок по газовым раковинам. Несмотря на значительные перепады давления между участками формы, в которых протекает газификация, и теми, где она ещё не началась, показали, что конвективная составляющая теплообмена также достаточно мала, поэтому нестационарную конвекцию в смесях со смоляным связующим при тепловом расчёте можно не принимать во внимание.

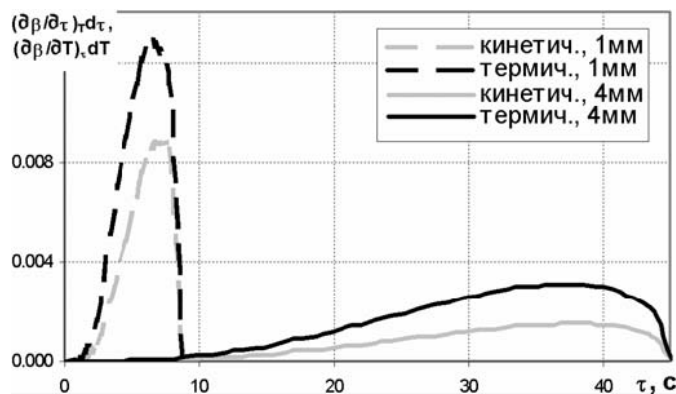


Рис. 4. Изменение степени превращения во времени

Сформулированная выше структурная модель формовочного материала способна учитывать изменчивость структуры смеси в зависимости от степени её прогрева. При нагреве песчано-смоляной смеси происходит трансформация её структуры, связанная с превращениями связующего: на начальном этапе может иметь место частичное спекание смеси; в участках, где деструкция прошла полностью, упаковка зёрен наполнителя становится рыхлой и несвязанной. Отмеченные структурные различия определяют разные условия для распростра-

нения тепла. С учётом того, что степень превращения связующего есть функция двух переменных – времени и температуры, получено [11]:

$$d\gamma = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} \right)_T d\tau + \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right)_\tau dT$$

, где первое слагаемое в правой части выражает скорость химической реакции при постоянной температуре (кинетический параметр), а второе – удельное количество разложившегося вещества при изменении температуры на один градус за фиксированный интервал времени (термический параметр). Расчёт производных производится по формулам [11]:

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial \tau} \right)_T = (1 - \gamma)^n K,$$

$$\left(\frac{\partial \gamma}{\partial T} \right)_\tau = (1 - \gamma)^n K E_a \tau / (RT^2), \quad K = K_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right);$$

где K_0 – константа реакции; n – показатель порядка реакции; E_a – энергия активации; R – газовая постоянная.

На рис. 4 сопоставлены полученные значения кинетического и термического параметров процесса деструкции при заливке сталью для слоёв формы, расположенных на разной глубине от границы контакта с металлом. Расчёты показывают, что в любом элементарном слое смеси термическая составляющая всегда выше кинетической, однако, их значения весьма близки. Отсюда следует, что в случае литья в песчано-смоляные формы для описания структуры смеси и прогноза её теплофизических свойств необходимо исходить из результатов сопряженного моделирования теплообмена и локальной кинетики фазового превращения в различных слоях смеси, что существенно уточняет как тепловой расчет, так и расчет газовых процессов для предупреждения соответствующих дефектов отливок.

Литература

1. Вейник А.И. Термодинамика литейной формы. М.: Машиностроение, 1968. – 332 с.
2. Atterton D. Thermal Conductivity of Bentonite Molding Sand // Journal of the Iron and Steel Institute. – 1953, vol. 173, № 3, p. 453-459
3. Midea T., Shah J.V. Mold Material Thermophysical Data. //AFS Transactions. – 2002, vol. 110, pt. 1, p. 121-136
4. Бройтман О.А., Голод В.М. Определение теплофизических характеристик формовочных материалов: история заблуждений и находок. //Сб. Литейное производство сегодня и завтра. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2006.
5. Бройтман О.А., Голод В.М. Структурная модель теплообмена в дисперсных формовочных материалах для автоматизированного прогноза их теплофизических свойств. //Труды III международной научно-практической конференции «Прогрессивные литейные технологии». М., МИСиС, 2005, с. 271-276
6. Дульнев Г.Н., Новиков В.В. Процессы переноса в неоднородных средах. Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
7. Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов. М.: Гос. изд-во физ.-матем. литер., 1962. – 456 с.
8. Gupta M., Yang J., Roy C. Modeling the Effective Thermal Conductivity in Polydispersed Bed Systems: a Unified Approach Using the Linear Packing Theory and Unit Cell Model // Canad. J. Chem. Eng., 2002, v. 80, Oct., p. 830-839
9. Раддл Р.У. Затвердевание отливок. М.: Машгиз, 1960. – 392 с.
10. Бройтман О.А., Голод В.М. Роль различных механизмов переноса тепла в формовочной смеси в зависимости от её структуры. //Сб. Материалы межвузовской научной

конференции в рамках XXXIII недели науки СПбГПУ. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2005, с. 166-167

11. **Серебро В.С.** Основы теории газовых процессов в литейной форме. М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.

12. **Бройтман О.А., Голод В.М.** Моделирование распределения газового давления в литейной форме. //Сб. Фундаментальные исследования в технических университетах. Материалы IX Всероссийской конференции. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 295-296