

Бройтман О.А.¹, Дубова Э.Р.²

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПОДХОДА К НАЗНАЧЕНИЮ СВОЙСТВ ФОРМОВОЧНЫХ СМЕСЕЙ ПРИ КОМПЬЮТЕРНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ФОРМИРОВАНИЯ ОТЛИВОК

¹ АО «СиСофт Разработка», Москва

² Санкт-Петербургский политехнический университет

Введение

Применение систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) является стандартной практикой при проектировании технологий производства отливок. Очевидной необходимостью при этом является знание пользователем СКМ ЛП заложенных в её основе детерминированных моделей процессов при литье, их ограничений и введённых допущений. Наличие подобной квалификации позволяет построить программу численного анализа при развитии технологического решения таким образом, чтобы извлечь максимальный объём полезной информации с использованием доступного функционала, исключить ошибочную интерпретацию результатов моделирования в связи с наблюдением эффектов, вызванных, к примеру, особенностями программной реализации численного решения, обусловленных комбинациями допущений и т.д.

В рамках названного аспекта владения СКМ ЛП следует обратить внимание, в частности, на устоявшуюся концепцию употребления характеристик тепловых, механических, фильтрационных свойств материалов песчаных форм и стержней. Принцип назначения этих свойств увязан, прежде всего, с серьёзным допущением об изотропности формы и предопределении поведения её материала на основе лишь некоторой их зависимости от температуры.

Свойства материала формы и расчёт формирования отливки

В связи с ключевым значением задачи расчёта температурно-фазовых полей при затвердевании отливки в форме особо критичным является ввод надёжных характеристик тепловых свойств. Исходным ракурсом проблемы является необходимость задания теплоёмкости и теплопроводности, присущих песчаной смеси, используемой на конкретно взятом производстве. Сходная задача имеется и в связи с необходимостью ввода при моделировании тепловых свойств заливаемого сплава. Решается она, однако, намного более эффективно в связи с более общим характером потребности в экспериментальном определении свойств сплавов, а также всё более широким распространением термодинамических баз данных металлических материалов [1, 2]. Что касается песчаных форм – потребность в их использовании, выполнении численного анализа процессов при

нагреве уплотнённых смесей разного состава локализована сугубо внутри практики литейного производства.

Расчёт затвердевания отливки в СКМ ЛП основан на решении уравнения Фурье, описывающем изменение температур в отливке и форме:

$$C(t)\rho(t)\frac{dt}{d\tau} = \nabla(\lambda(t)\nabla t) + I, \quad (1)$$

где t – температура; τ – время; $C(t)$, $\rho(t)$, $\lambda(t)$ – температурнозависимые значения удельной теплоёмкости, плотности и теплопроводности соответственно; I – функция теплового источника. В зависимости от того, для какого объёма в составе сеточной модели выполняется численное решение уравнения (1), на место тепловых свойств подставляются значения, присущие материалу сплава, формы, стержня, холодильника и т.д. Работа источника тепла в металле обусловлена протеканием фазовых превращений при затвердевании или в твёрдом состоянии. Функция источника в отношении к материалу формы описывает эффекты, связанные с термодеструкцией связующего, испарением и конденсацией влаги, а в случае термитной смеси – выделением надлежащей порции тепла для целенаправленного обогрева участков металла.

Уравнение (1) подлежит решению в комбинации с граничными условиями (в наиболее распространённом варианте для разных СКМ ЛП – III рода), записываемыми для поверхности раздела между отливкой и формой, разными частями комбинированной формы, отливкой и окружающей средой, формой и окружающей средой.

Проблема экспериментального определения свойств

Наиболее предпочтительным способом формирования информационного обеспечения расчётов затвердевания свойствами материалов формы является выполнение экспериментов по их установлению для смесей, используемых на конкретно взятом предприятии. При этом математический аппарат, лежащий в основе теории выбранного метода определения свойств и обработки результатов экспериментов, должен находиться в согласовании с используемым при проведении численных расчётов [3, 4]. Установлению должны подлежать свойства, характеризующие локальный участок формы, находящийся при определённой температуре, а не представляющие собой интегральную характеристику некоторого объёма неравномерно прогретого материала. Подобный подход обеспечит возможность корректного употребления в СКМ ЛП свойств, не зависящих от температуры заливаемого сплава и конфигурации поверхности формы.

Не вполне верным будет считать установленные однажды свойства впредь абсолютно точными. Опытный пользователь моделирующей системы должен принимать во внимание возможный их дрейф в связи с регистрируемыми и нерегистрируемыми

нестабильностями зернового состава, использованием связующих материалов одной системы, но от разных производителей, различием в уплотнении смеси при использовании разного оборудования и т.д. На этом фоне свойства разных смесей, содержащиеся в литературных источниках или базах данных, поставляемых в комплекте с СКМ ЛП, следует признать тем более лишь опорными, во всех случаях отклоняющимися в той или иной мере от применяемых на производстве, требующими проверки и отладки по мере накопления по меньшей мере результатов сравнения прогноза качества отливки с наблюдаемым на практике.

Прогноз свойств с использованием структурных моделей

Для решения проблемы установления свойств материалов форм в обход многочисленных дорогостоящих экспериментов могут быть привлечены модели, описывающие распространение тепла в сложноструктурированной зернистой системе [5-7]. Практика их использования показала удовлетворительное соответствие данным эксперимента, в особенности для случая моделирования свойств смесей на глинистой связке, уплотнённого песка или засыпки без связующего. Осложнением процедуры использования моделей является необходимость ввода или расчёта внутри самих моделей большого числа параметров, влияющих главным образом на описание условий контакта между частицами зерновой основы в оболочке связующего. Эти параметры во многом зависят от индивидуальных характеристик формы зёрен, косвенно связаны с измеряемыми характеристиками уплотняемости, газопроницаемости смеси и др., но наилучшим образом могут быть установлены посредством микроскопного анализа шлифов смеси [8, 9]. Последнее является сложнореализуемым в условиях производственных лабораторий, а также учитывая необходимость контроля смесей в широком диапазоне составов.

Модель прогноза свойств материала формы на сегодняшнем этапе является лучшей альтернативой неопределённости при необходимости их ввода в отсутствие экспериментальных данных. Безусловно полезная роль при использовании таких моделей в качестве эвристических для выявления нетривиальных тенденций трансформации свойств в связи с изменением составов, плотности смесей. Расчётная модель даёт пространство для произвольных вычислительных экспериментов и однозначного выявления этих тенденций. К примеру, на рис. 1 по результатам вычислительного эксперимента, отталкиваясь от составов песчано-глинистых смесей (ПГС) с кварцевым песком и бентонитом, дана характеристика влияния добавки связующего X , а также его теплопроводности (замена связующего) на эффективную теплопроводность смеси. Показано, что увеличение X приводит к росту площадок контакта между зёрнами основы, что ощутимо сказывается на повышении теплопроводности смеси. В то же время при той же добавке даже пятикратное

(не реалистичное) снижение теплопроводности некоего «условного» связующего не оказывает существенного влияния на результирующую теплопроводность смеси в силу малости толщины плёнки связующего и в любом случае низкого её теплового сопротивления. Решающее влияние на уровень теплопроводности смеси оказывает не столько сам тип связующего, сколько плотность смеси, его концентрация, размер зёрен и площадок контакта между ними.

Следует также заметить, что входные характеристики материала для расчёта свойств представляют собой совокупность данных о находящемся в собранной форме конечном продукте формовки в виде уплотнённой и отверждённой полуформы или стержня, а параметры, относящиеся к этапу смесеприготовления и, частично, используемым при этом добавкам становятся второстепенными (наподобие со сплавом, который характеризуется результатом выплавки, а не всеми используемыми для этого материалами). Подобное очевидно и для условий постановки эксперимента по установлению свойств, проводимого на образце смеси, как можно ближе повторяющем состояние материала готовой формы.

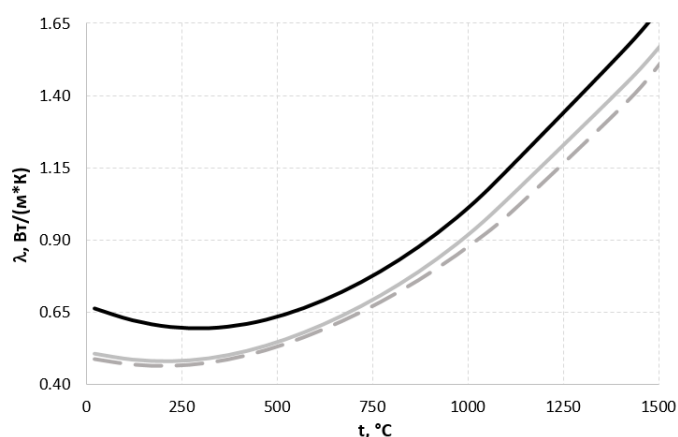


Рис. 1. Вычислительные эксперименты на структурной модели [5] для расчёта теплопроводности смеси (средний размер зёрен основы 0,25 мм, плотность 1545 кг/м³): серая кривая – ПГС, X=4%; пунктирная кривая – «условное» связующее с пятикратно сниженной теплопроводностью, X=4%; чёрная кривая – ПГС, X=8%

Перспективой развития использования структурных моделей для прогноза свойств формовочных смесей является углубление их интеграции с данными экспериментов, построенных по таким правилам, чтобы их результаты были пригодны к сочетанию с теоретическими представлениями.

Наличие у пользователя СКМ ЛП представлений о порядке и закономерностях поведения характеристик теплофизических и др. свойств материалов форм существенно при развитии технологий получения отливок заданного качества. На рис. 2 показан фрагмент расчёта в СКМ ЛП «ПолигонСофт» отливки, стенка (30 мм) которой содержит

утолщение, приводящее к появлению теплового узла. Для его компенсации может быть применено захлаживание с использованием разных материалов. Распространённым заблуждением является переоценка теплоотводящей способности смесей на основе хромитового песка, эффект использования которых состоит в ускорении создания твёрдой корки и повышении чистоты поверхности отливки. Теплопроводности смесей на основе хромита и кварца близки, в отличие от объёмной теплоёмкости – у хромитовой она примерно в полтора раза больше за счёт повышенной плотности зёрен. Облицовка хромитовой смесью не способна создать условия ускоренного теплоотвода на достаточной глубине для компенсации массивного теплового узла, как в случае использования стального холодильника, теплофизические свойства которого в десятки раз выше.

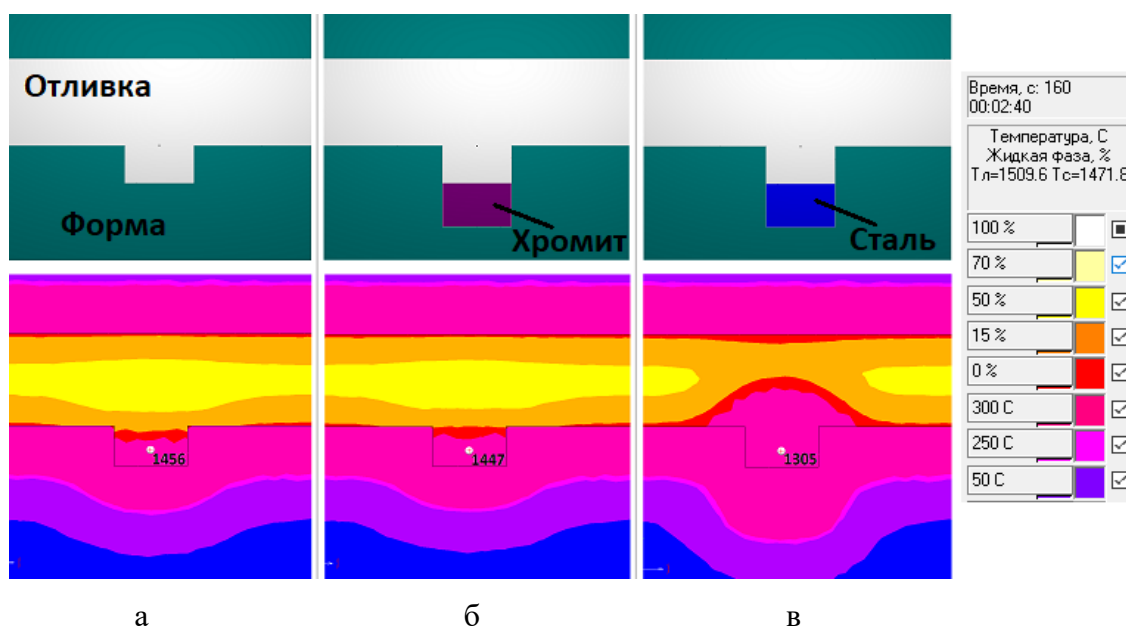


Рис. 2. Тепловой узел и эффективность его компенсации

(поля жидкой фазы и температуры в идентичный момент времени 160 с):

а – ПГС на основе кварца; б – ПГС на основе кварца и хромита (местная облицовка);

в – ПГС на основе кварца и стальной холодильник

Сочетание чётких представлений об уровне теплофизических свойств разных смесей с накопленным опытом моделирования формирования отливок в СКМ ЛП позволяет изначально осуществить осознанный выбор подходящих комбинаций материалов для устройства литейной формы.

Фактор трансформации структуры и состава материала формы

Алгоритм ввода в СКМ ЛП тепловых свойств формы в составе исходных данных, как и дальнейшего употребления при расчёте, предполагает предопределение их в виде температурных зависимостей. Очевидным допущением при этом является принятие моментального изменения характеристик материала при достижении той или иной

температуры, чего в общем случае недостаточно для полноценного описания поведения свойств при нагреве смеси. Объём пор и параметры контакта частиц формовочных смесей изменяются по мере термодеструкции таких нестойких компонент, как смоляное связующее и выгорающие добавки, реализуются процессы спекания, а в дополнение к перечисленному имеется размерная нестабильность зёрен основы [10, 11, 5].

В связи с различием температуры заливаемого металла и конфигураций стенки формы превращения в смеси реализуются при неодинаковых температурно-временных условиях. Динамика реакции разложения связующего характеризуется степенью превращения γ , являющейся функцией двух переменных – времени и температуры [10]:

$$d\gamma = \left(\frac{\partial\gamma}{\partial\tau}\right)_t d\tau + \left(\frac{\partial\gamma}{\partial t}\right)_\tau dt, \quad (2)$$

где производная по времени выражает скорость химической реакции при постоянной температуре (кинетический параметр), а производная по температуре – удельное количество разложившегося вещества при изменении температуры за фиксированный интервал времени (термический параметр).

С учётом изложенного уточнённая концепция ввода и использования свойств смесей должна предполагать их отображение в декартовой системе координат функцией вида $f=f(t, \tau, x, y, z)$.

Фактор неравномерного уплотнения смеси

Допущение о постоянной средней плотности по объёму формы или стержня, благодаря которому описание их свойств сводится к простому вводу температурной зависимости, характерной для настоящей средней плотности, является, очевидно, наиболее существенным приближением, способным оказать негативное влияние на точность результата прогноза качества отливки. В практике моделирования затвердевания фасонной отливки погрешность, вносимая по вине этого и других допущений в результат прогноза, к примеру, усадки может отчасти нивелироваться существенно большей зависимостью от, собственно, конфигурации отливки. При изготовлении массивных отливок затвердевание центральных участков заготовки регулируется теплофизическими свойствами окружающего металла, однако остывание в целом тормозится низкотеплопроводной литейной формой.

Использование автоматического формовочного оборудования позволяет достигать повторяемости распределения плотности в объёме форм и стержней, что поддаётся измерению на практике [12, 13]. Данные о распределении плотности могут быть также извлечены из результатов моделирования процессов уплотнения при надуве, прессовании смеси и др. при помощи стандартных программных средств [13, 14]. По результатам

подобных измерений или расчётов ввод поля плотности может быть осуществлён в качестве исходных данных при моделировании формирования отливок, с учётом чего оказывается возможным дифференцированное назначение тепловых, фильтрационных и механических свойств смеси в связи с пространственной координатой [14].

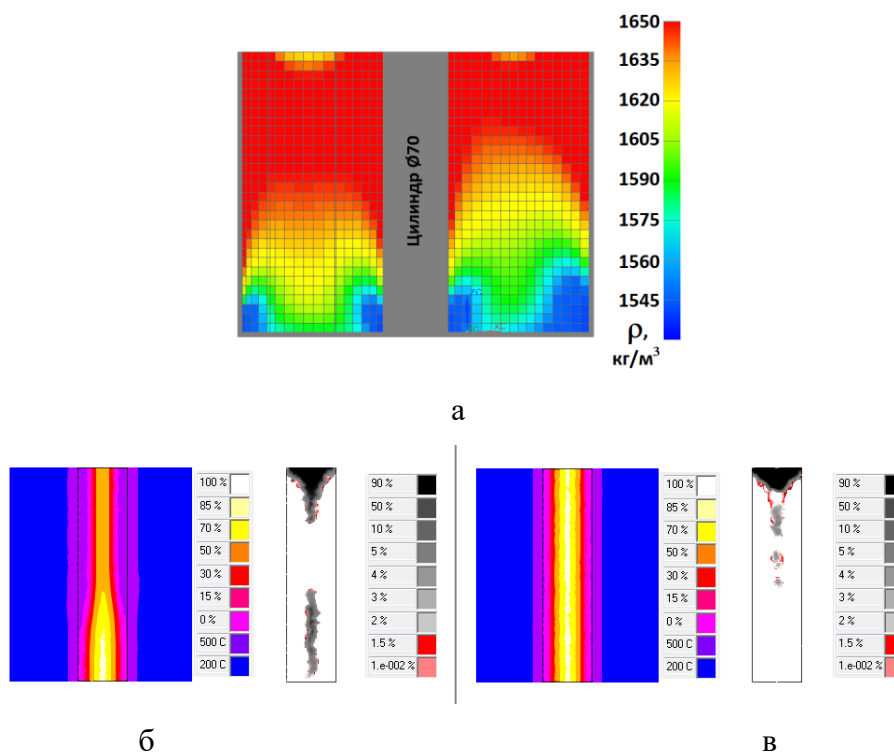


Рис. 3. Затвердевание цилиндрической пробы при заливке стали в формы разной структуры: а – распределение плотности в анизотропной форме; б – характерное распределение жидкой фазы в один из моментов охлаждения пробы в анизотропной форме и прогноз усадки по завершении затвердевания; в – то же для условий изотропной формы с назначенной средневзвешенной плотностью

На рис. 3 продемонстрировано влияние учёта распределения плотности в форме на результат расчёта затвердевания цилиндрической пробы $\varnothing 70$ мм. Данные о распределении плотности в песчано-глинистой форме (рис. 3, а), уплотняемой однократным прессованием плоской колодкой при давлении 0,8 МПа, получены посредством расчёта в NX Advanced Simulation. Диапазон составил около 1545-1645 кг/м^3 . После этого осуществили конвертацию поля плотности с загрузкой в препроцессор СКМ ЛП «ПолигонСофт»; с учётом локального её значения каждому участку смеси присвоены температурнозависимые теплофизические свойства. Последовавшие тепловые расчёты таким образом учитывали разброс свойств в связи с различием плотности по объёму формы (рис. 3, б).

Дополнительно определена средневзвешенная плотность формы (как если бы был осуществлён контроль взвешиванием на производстве; получено 1605 кг/м^3) и выполнен

типовой тепловой расчёт, в котором свойства формы назначены идентичными по всему объёму. Характерное распределение температур в один из моментов затвердевания цилиндрической пробы в случае учёта неравномерности уплотнения по высоте формы, как и результат прогноза усадочных дефектов, расходится с идеализированным случаем затвердевания в форме с неизменной по объёму плотностью. Перемещение теплового узла в первом случае приводит к миграции зоны со значительной усадочной пористостью под уровень ниже 1/2 высоты цилиндра, тогда как в идеализированном варианте она располагается выше этой отметки. Подобное уточнение тепловой картины процесса формирования отливок скажется на исходе прогноза горячих трещин, газовых дефектов, способно прояснить, к примеру, причины возникновения местного отбела на чугунных отливках и т.д.

Заключение

Повышение требований к качеству моделирования средствами СКМ ЛП приводит к необходимости совершенствования заложенных алгоритмов и моделей для углублённого учёта процессов, протекающих в литейных формах и стержнях. Соответствующие модели и представления входят в те базы знаний о процессах в литейном производстве (смесеприготовление, уплотнение при формовке, отверждение смеси, стойкость и поведение отдельных её компонентов, химическое взаимодействие материала формы с металлом и др.), обращение к которым традиционно остаётся за пределами устоявшейся концепции компьютерного моделирования формирования отливок с применением стандартных средств. В эпоху цифровизации возникает также техническая возможность преодоления ряда допущений, принятых при разработке моделей в основе СКМ ЛП, ведь их введение часто было напрямую связано ещё и с ограниченностью вычислительных мощностей, несовершенством подходов к созданию пользовательских интерфейсов.

Литература

1. Saunders N., Kucherenko S., Li X., Miodownik A. P., Schille J. P. A New Computer Program for Predicting Materials Properties. //Journ. of Phase Equilibria, 2001, v. 22, No. 4, pp. 463–469
2. Carlson K.D., Beckermann C. Development of Thermophysical Property Datasets, Benchmark Niyama Results, and a Simulation Qualification Procedure. //Proceedings of the 64th SFSA Technical and Operating Conference, Chicago, IL, 2010
3. Midea T., Shah J.V. Mold Material Thermophysical Data. //AFS Transactions, 2002, v. 110, pt. 1, pp. 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, с. 196-207
5. Бройтман О.А. Моделирование структуры и распространения тепла в дисперсных формовочных материалах для прогноза их теплофизических свойств. //Сб. Компьютерный анализ литейной технологии: проблемы и перспективы. СПб.: ЦНТИ Прогресс, 2007, с. 15-25
6. Park S.I., Hartley J.G. A Model for Predicting the Thermal Conductivities of Bentonite-Bonded Molding Sands at High Temperatures. //KSME Int. Journ, 1997, v. 11, No. 4, pp. 435–442
7. Jackson K.W., Black W.Z. A Unit Cell Model for Predicting the Thermal Conductivity of a Granular Medium Containing an Adhesive Binder. //Int. Journ. of Heat and Mass Transfer, 1983, v. 26, No. 1, pp. 87–99
8. Боровский Ю.Ф. Классификация смесей. //Литейное производство, 1980, № 12, с. 14-15
9. Дубова Э.Р. Моделирование теплопередачи в формовочных смесях. //Сб. Литейное производство сегодня и завтра. СПб.: Изд-во Культ-информ-пресс, 2020, с. 113-124
10. Серебро В.С. Основы теории газовых процессов в литейной форме. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
11. Васильев В.А. Физико-химические основы литейного производства. М.: Изд-во МГТУ, 1994. – 320 с.
12. Шацких М.И. Формовочные и стержневые смеси. – Л.: Машиностроение, 1969. – 96 с.
13. Бройтман О.А., Бабков Д.С., Белозёров С.А., Петров А.И., Иоффе М.А. Исследование процессов формирования свойств песчаных стержней. //Литейщик России, 2017, № 10, с. 38-40
14. Broytman O.A., Babkov D.S., Ioffe M.A. Computer Modeling of Castings Quality with Taking into Account the Differentiation of Structure-Dependent Cores and Molds Material Properties. //Int. Journ. Machines, Technologies, Materials, 2015, No. 4, pp. 15-18