

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК В ПЕСЧАНЫХ ФОРМАХ С НЕРАВНОМЕРНОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

к.т.н. Бройтман О.А.<sup>1</sup>, Д.С. Бабков<sup>1</sup>, Шварц Д.Р.<sup>2</sup>, д.т.н. Иоффе М.А.<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>ООО «ВНИЦТТ», <sup>2</sup>ООО «СиСофт Полигон плюс», <sup>3</sup>СПБПУ, Санкт-Петербург)

Численный анализ с использованием систем компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) в настоящее время стал традиционной процедурой при разработке технологии производства отливок. Основной тенденцией развития такого подхода при проектировании литейной технологии является повышение адекватности компьютерного анализа, связанное с совершенствованием существующих и разработкой новых моделей для прогноза условий формирования качества отливки, а также уделением особого внимания точности вводимых при расчётах физических и физико-химических характеристик материалов. Положительное влияние на качество анализа литья способно оказать введение в состав исходных данных сведений о неравномерно распределённых температурнозависимых характеристиках материала форм и стержней [1].

До недавнего времени направление компьютерного анализа условий изготовления песчаных форм и стержней [2-4] развивалось независимо и ограничивало себя задачей проектирования конструкций модельно-стержневой оснастки для обеспечения изготовления в ней изделий удовлетворительного качества. Однако в работе [5] было показано, что использование результатов предсказания неравномерно распределённой плотности формы для генерации поля её тепловых и фильтрационных свойств с дальнейшим их употреблением при расчётах затвердевания способно существенно уточнить прогноз качества литых заготовок. Предложенная методика (рис. 1) требовала развития программных интерфейсов и инструментов, позволяющих сделать предусмотренную цепочку действий доступной при разработке технологии изготовления отливок произвольной конфигурации.

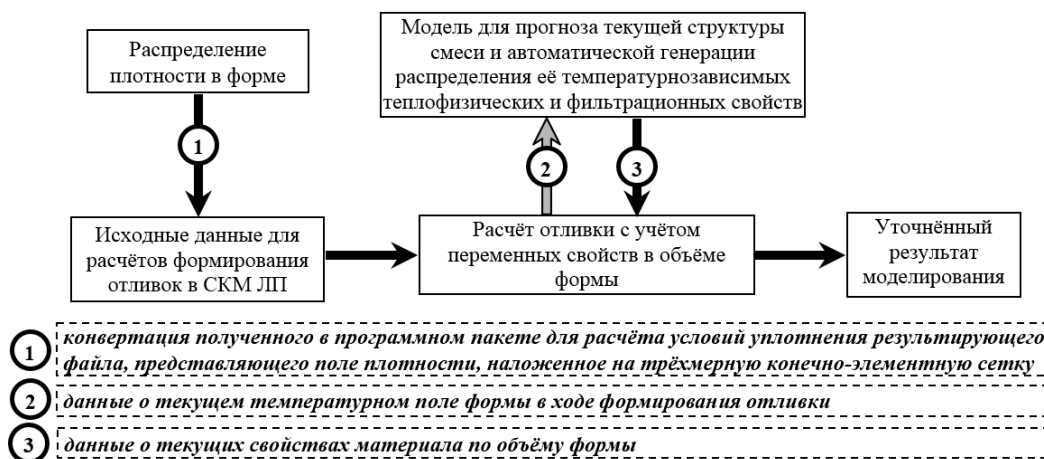


Рис. 1. Алгоритм реализации методики учёта неравномерно распределённых характеристик материала формы при расчёте формировании отливки

Созданное в результате настоящей работы программное решение позволяет присоединять установленные в соответствующих расчётных пакетах, способных моделировать разные условия уплотнения, поля плотностей стержней и форм к набору исходных данных, необходимых при анализе формирования фасонных отливок в СКМ ЛП «ПолигонСофт». Исходя из распределения плотности перед заливкой и последующего возможного изменения структуры смеси во времени в связи с прогревом формы каждому узлу соответствующей конечно-элементной сетки на каждом шаге по времени в ходе расчёта отливки присваивается уникальный набор температурнозависимых эффективных теплофизических свойств, сгенерированных на основе структурных моделей [6].

Дифференцированное по пространственным координатам назначение теплофизических свойств материала формы способно повысить точность тепловых расчётов при анализе формирования отливок.

На рис. 2 показаны иллюстрации к примеру реализации указанного подхода при разработке технологии литья отливки железнодорожного назначения «Упор правый». Отливки (рис. 2, а) массой около 7 кг, габаритными размерами порядка 155x155x100 мм изготавливают из стали марки 20ГЛ в формах из песчано-глинистой смеси на основе песка K016, содержащей 10% глины и 2,5% воды. Полуформы получают методом однократного верхнего прессования плоской колодкой, причём начальная плотность смеси перед прессованием составляет 1370 кг/м<sup>3</sup>.

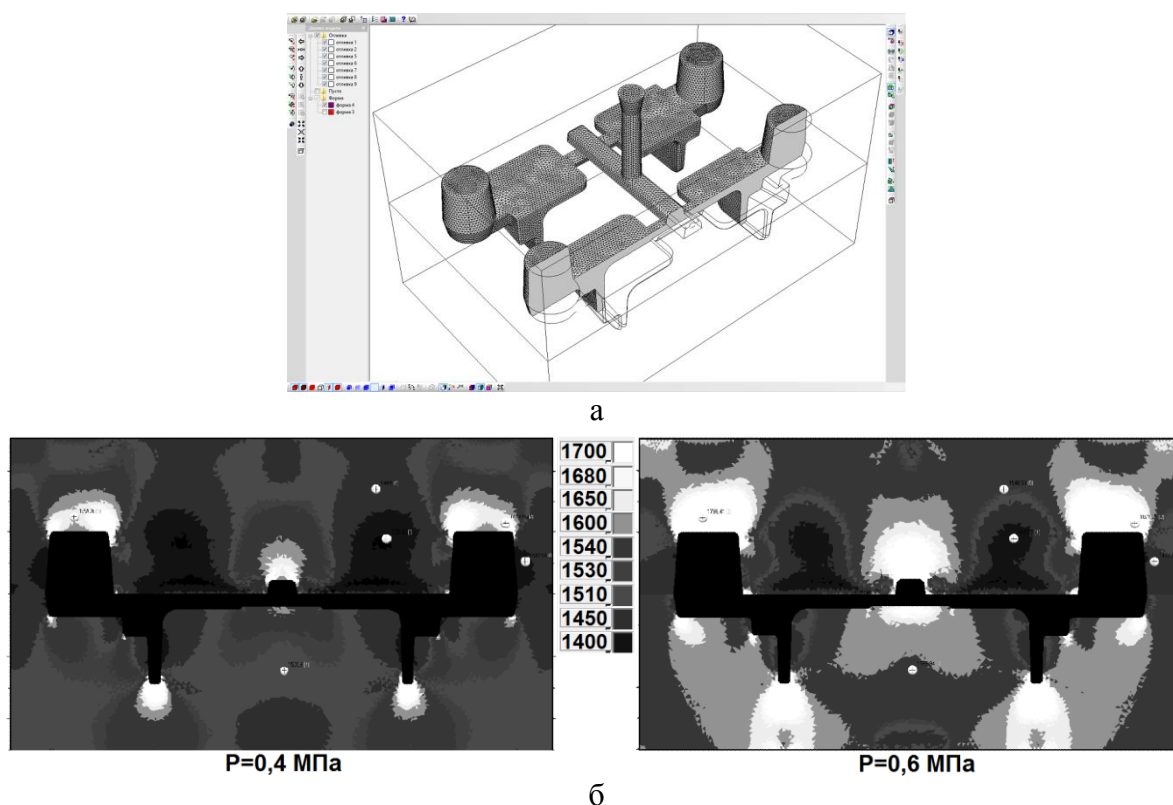


Рис. 2. Расчёты уплотнения формы при изготовлении отливок «Упор правый»:  
 а – конечно-элементная модель куста отливок (показан контур формы);  
 б – перенесённое в СКМ ЛП поле плотности формы (кг/м<sup>3</sup>)  
 для разных давлений прессования смеси

Первоначально проводили расчёты уплотнения смеси при прессовании с помощью приложения NX Advanced Simulation. Постановка типовой задачи и принимаемые допущения ранее излагались в [1]. Механические свойства смеси, экспериментально установленные в условиях трёхосного сжатия, задавали следующими: модуль общей деформации  $E=16,4$  МПа, коэффициент поперечной деформации  $\mu=0,32$ . Коэффициент внешнего трения смеси о стенки металлической оснастки в условиях применения модельной смазки принимали  $f=0,1$ . Давление прессования  $P$  варьировали в интервале 0,3-1,0 МПа. Полученное в результате критериальной обработки поля деформаций смеси пространственное распределение её плотности в полуформах  $\rho$  было затем перенесено в СКМ ЛП. Возникшая при этом геометрическая модель полуформ в собранном состоянии с назначенным исходным распределением плотности (рис. 2, б) являлась частью данных, вводимых при расчётах затвердевания отливок «Упор правый». В процессе расчёта затвердевания отливок обновлённый решатель СКМ ЛП обращался к генерируемым на основе данных о плотности эффективным теплофизическим свойствам в каждом участке смеси, что позволило достичь повышения точности прогноза качества литых заготовок.

Увеличение давления прессования стимулирует рост объёма в большей мере уплотнённых участков смеси, в частности, над существенно возвышающимися частями оснастки. В то же время достижение необходимой минимальной плотности смеси может быть осложнено при значительной глубине и малой ширине «карманов», образованных близко расположенными друг к другу частями модели, моделью и стенкой опоки. После заливки формы соседство разных элементов затвердевающей отливки с уплотнёнными в большей или меньшей степени участками смеси приводит к усиленному или пониженному теплоотводу от соответствующих зон расплава.

Результаты расчётов отливок с учётом неравномерно распределённых теплофизических свойств формы сравнивали с полученным в случае сохранения традиционного подхода, когда значение плотности смеси (и соответствующих ей температурнозависимых теплофизических свойств) принимается осреднённым, неизменным по объёму формы. Показали, что принимаемое в обычном случае пренебрежение неравномерностью свойств по объёму формы после её уплотнения способно повлиять на точность анализа формирования отливки. Так, различие полной продолжительности затвердевания куста для обычного и уточнённого случаев достигало 12%, а изменение последовательности затвердевания отливок привело к несовпадению прогнозов образования термических узлов и пористости. В показанном на рис. 3 примере приведена пористость в отливке по результатам расчётов для случаев задания неравномерного либо равномерного распределения свойств формы.

Из представленных данных следует, что учёт неравномерного распределения плотности и, соответственно, теплофизических свойств смеси при расчёте формирования отливок может повлиять на конструкцию и размеры элементов литниково-питающей системы, коэффициент выхода годного и, в конечном итоге, на общую эффективность производства.

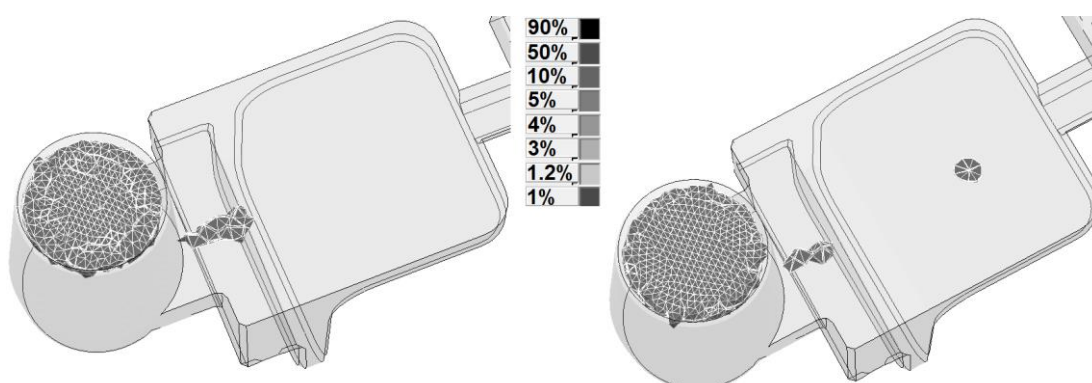


Рис. 3. Результаты расчётов затвердевания отливки «Упор правый» в форме, уплотнённой при  $P=0,6$  МПа: слева – с учётом неравномерного распределения свойств по объёму смеси; справа – без учёта (соответствуют средней  $\rho=1605$  кг/м<sup>3</sup>)

Показанный в работе программный инструмент является интегрируемым в состав СКМ ЛП средством, позволяющим производить учёт влияния неравномерной структуры смеси на теплообмен при формировании отливок. Данные о плотности смеси служат основой для вычисления пространственного распределения её фильтрационных свойств [1], поэтому при включении в состав решателя необходимых моделей массопереноса [6] возможным оказывается проведение уточнённого численного анализа газового режима формы и связанных дефектов отливок.

В условиях налаженного интерфейса между разнопрофильными расчётными пакетами для анализа условий литья и изготовления форм интерес представляет поиск решения обратной задачи о подборе таких условий уплотнения, которые бы способствовали получению литых заготовок заданного качества. Необходимость регулирования теплоотвода от отдельных частей отливки требует дополнительного

использования внутренних и внешних металлических холодильников, смесей на иной зерновой основе. Более экономичным выглядит возможное в некоторых случаях достижение эквивалентного эффекта за счёт обеспечения подходящей степени уплотнения основной формовочной и стержневой смеси.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бройтман О.А., Иоффе М.А., Шевченко Д.В. Формирование структурно-зависимых свойств формовочной смеси при уплотнении. //Литейщик России, 2014 – 1, с. 20-23
2. Snider D.M. Three Fundamental Granular Flow Experiments and CPFD Predictions. //Powder Technology, 2007, No. 176, p. 36–46
3. Dańko J., Dańko R., Burbelko A., Skrzyński M. Parameters of the Two-Phase Sand-Air Stream in the Blowing Process. //Archives of Foundry Engineering, 2012, vol. 12, No. 4, p. 25-30
4. Lia W., Wu J. Numerical Simulation of Compacting Process of Green Sand Molding Based on Sand Filling //Materials Science Forum, 2007, vols. 561-565, p. 1879-1882
5. Broymtan 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, p. 15-18
6. 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