

УДК 669 (075.8)

Опыт использования математического моделирования в технологической подготовке литейного производства

И.О. Леушин*, В.А. Решетов

*Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е.Алексеева
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24*

Received 13.01.2014, received in revised form 21.03.2014, accepted 05.06.2014

Изложены основные принципы формирования систем математического моделирования в технологической подготовке литейного производства, приведены примеры таких систем, указана необходимость интеграции пакетов математического моделирования в программный комплекс систем автоматизированного проектирования (САПР).

Ключевые слова: автоматизация технологической подготовки производства, литейное производство, математическое моделирование процессов.

Литейное производство, как и другие области науки и техники, помимо сферы практической деятельности является и сферой иррационального мышления инженера. Это требует от специалиста-профессионала широты и многопрофильности знаний, определяющих свободу творчества, а также серьезной мотивации к активному использованию в своей работе возможностей современной техники, программного обеспечения, вычислительных алгоритмов, IT- и RP-технологий.

В практике литья исторически сложилась такая ситуация, когда освоение и запуск в условиях действующего производства столь сложного процесса требует привлечения значительных временных и трудовых ресурсов для неизбежных отладки технологических параметров и доводки оснастки. При этом специалистами единодушно признается факт отсутствия иных эффективных вариантов, применимых в качестве альтернативы.

На этом фоне все более обостряется проблема использования в инженерной практике накопленного материала в части математического моделирования объектов литейного производства.

Математическое моделирование предполагает использование абстрактных, виртуальных моделей, в качестве которых обычно выступают математические объекты: уравнения, неравенства, их системы, графики, множества, фигуры и т.д. Возможность для исследователя технического объекта широкого выбора соответствующих оригиналу математических объектов во многом определяет разнообразие математических моделей.

© Siberian Federal University. All rights reserved

* Corresponding author E-mail address: igoleu@yandex.ru

Ключевой в математическом моделировании признана проблема выбора вида математической модели. Обычно она рассматривается с учетом особенностей инженерных задач, которые предполагается решать на модели, вида математического описания моделируемого объекта, его структурно-функциональной характеристики на основе классификации математических моделей [1].

В частности, технологическая подготовка производства отливок предполагает широкое использование структурных, геометрических, функциональных, теоретических и формально-статистических математических моделей, на которых становится возможным решение задач проектирования, прогнозирования и оптимизации с привлечением мощного инструментария современных вычислительных алгоритмов и IT-технологий.

В качестве базы для этого выступают соответствующее техническое, математическое, методическое и программное обеспечение [2].

Основными трудностями, с которыми приходится сталкиваться при решении задач технологической подготовки производства литья, являются сложность математического описания процессов и недостаточная теоретическая подготовка производственников в данной области. Это препятствует применению в технологической подготовке литейного производства широко известных общинженерных пакетов математического моделирования, таких как ANSYS и NASTRAN. Данные программные пакеты, будучи универсальным инструментом в инженерной практике, предъявляют значительные требования как к объекту моделирования, так и к самому пользователю. Их применение потенциально позволяет решить все задачи, возникающие в процессе деятельности инженера литейного профиля, но в реальности таких решений нет.

При математическом моделировании объекты заменяются абстрактным описанием, достоверность которого определяется объемом исходной информации, находящейся в распоряжении пользователя. Поэтому негативную роль в адаптации таких серьезных программных пакетов к условиям конкретного производства играет отсутствие подробной и, главное, достоверной информации о характеристиках процессов, протекающих в изучаемых объектах.

Кроме этого, важную роль играет точность построения моделируемого объекта. Современные программные средства позволяют получать виртуальные 3D-модели с высокой точностью, однако в ходе производства реальных моделей эта точность снижается из-за ограниченных возможностей технологического оборудования.

Это привело к созданию специализированных программ, реализующих только ограниченный функционал моделей в весьма узких областях применения.

В российских университетах такие программы (POLYCAST, POLYFORM СПбГПУ, г. Санкт-Петербург), как правило, создавались применительно к задачам конкретных предприятий и ограничивались частными случаями и существенными упрощениями и допущениями. Дальнейшее их развитие требовало привлечения множества специалистов, а также соответствующего финансирования.

Современное развитие компьютерной техники полностью снимает ограничения по объему оперативной памяти персональных компьютеров, необходимой для решения самых сложных задач, с которыми сталкиваются технологи-литейщики. Опыт практического применения систем автоматизированного моделирования литейных процессов показал, что программные

продукты зарубежных производителей не получили широкого распространения на российском рынке из-за высокой цены программ, отсутствия в большинстве случаев русского интерфейса и отечественной базы данных по материалам и сплавам, а также сложности обучения.

Программы для моделирования литейных процессов, используемые сегодня в России, различаются степенью полноты факторов, учитываемых при моделировании, и, соответственно, стоимостью. Другое их существенное отличие связано с методами получения и решения уравнений и неравенств исходной постановки задачи.

Метод конечных разностей (МКР) базируется на уравнениях в дифференциальной форме, при этом дифференциальные операторы заменяются конечно-разностными соотношениями различной степени точности. Как правило, они строятся на ортогональных сетках (прямоугольной, цилиндрической и т.д.). Это позволяет факторизовать операторы и свести решение многомерной задачи к последовательности одномерных задач, а значит, существенно упростить и ускорить решение общей системы уравнений. К недостаткам метода следует отнести плохую аппроксимацию границ сложных областей, что не слишком принципиально для уравнений теплопроводности, но довольно существенно для уравнений гидродинамики. Кроме того, метод плохо работает в случае тонкостенных отливок, когда толщина стенок становится сравнимой с шагом сетки.

Метод конечных элементов (МКЭ) и метод конечных объемов (МКО) базируются на уравнениях тепломассопереноса в интегральном виде. Область существования модели разбивается на элементы, внутри которых строятся аппроксиманты функций на основе системы базисных функций, определенных на каждом элементе. «Проецируя» интегральные уравнения на эти базисы, получают систему разностных уравнений. Система значительно сложнее принятой в МКР, ее решение требует больших ресурсов памяти и немалого времени. Одно из главных достоинств метода конечных элементов – хорошая аппроксимация границ, а основные недостатки – необходимость в добротном генераторе конечных элементов, сложность уравнений и невозможность факторизации.

Модификации МКО пытаются соединить в себе простоту и факторизацию МКР и хорошую аппроксимацию границ между различными материалами и различными фазами, присущую МКЭ.

Сравнительная оценка двух математических методов, МКР и МКЭ, не раз приводилась в научных изданиях [3, 4]. Авторы этих обзоров успешно показали, что при решении некоторых вопросов моделирования литейных процессов предпочтительнее МКЭ. Действительно, при решении задач, связанных, например, с получением тонкостенных отливок больших геометрических размеров, МКЭ обеспечивает ряд преимуществ, поскольку позволяет использовать конечные элементы разной дискретности. Использование МКР в подобных случаях приводит к увеличению количества узлов сетки и, следовательно, к большей продолжительности компьютерного расчета.

К типовым задачам технологической подготовки производства отливок традиционно относятся:

- разработку и оптимизацию технических схем изготовления отливок;
- проектирование и изготовление литейной оснастки;
- прогнозирование образования литейных дефектов.

Для решения задач первого класса используются системы класса PDM/CAPP, подобные модули также реализованы на текущий момент в большинстве современных CAD-систем, таких как Siemens NX, ADEM и др.

Следует отметить слабую проработку вопроса проектирования и изготовления оснастки со стороны производителей программного обеспечения, поскольку мощных решений, основанных на структурном проектировании, пока не существует. Хорошим подспорьем для решения этих задач могут служить программные пакеты типа Autodesk Inventor, ориентированные на решение «механических задач».

Полученная виртуальная трехмерная геометрия оснастки затем может быть реализована в физические объекты с использованием технологий быстрого прототипирования (RP-процессы). При этом можно отметить, что средства проверки, имеющиеся в современных «механических» пакетах, позволяют оценить точность последующего технологического процесса, провести оценку основных механических свойств конструктива оснастки, а также сформировать матрицу экономической оценки процесса проектирования.

К настоящему времени технологии быстрого прототипирования достигли такого уровня, когда их применение сравнимо по затратам с типовыми процессами изготовления литейной оснастки, а время рабочего цикла существенно меньше такового для базовых вариантов ручного или машинного способов изготовления комплектов модельно-опочной оснастки, дорабатываемой по результатам длительного итерационного производственного апробирования.

К основным RP-технологиям, реализуемым в технологических процессах литья, по нашему мнению, следует отнести:

- SLA (Stereo Lithography Apparatus), построение модели методом послойного отвердевания фотополимера под воздействием луча лазера;
- SLS (Selective Laser Sintering) – технология лазерного спекания порошковых материалов;
- FDM (Fused Deposition Modeling) – послойная укладка расплавленной до полужидкого состояния полимерной нити в соответствии с геометрией математической модели детали.

Кроме того, в условиях современного производства весьма эффективным представляется использование оборудования с ЧПУ для изготовления деталей оснастки и разовых литейных форм методом прямой механической обработки заготовок из материалов на неорганических связующих.

Решение задач прогнозирования образования литейных дефектов, на наш взгляд, определяется адекватностью математического описания процессов, лежащих в основе разнообразных и разноплановых технологий литья.

Сегодня в России нашли применение около десятка систем автоматизированного моделирования литейных процессов (САМ ЛП). Специалистам хорошо известны немецкая программа MagmaSoft и французская Procast, в этом же ряду можно упомянуть американскую SolidCast, финскую CastCAE и немецкую WinCast. Кроме того, положительные отзывы от производителей получили:

- Polycast (кафедра физико-химии литейных сплавов и процессов СПбГПУ, г. Санкт-Петербург) – интегрированная САПР, представляющая собой комплекс программ, автоматизирующих решение совокупности задач, возникающих при разработке литейной технологии:

от выбора конструкции и определения размеров литниково-питающей системы до численного моделирования основных этапов процесса изготовления отливки (заливка, затвердевание в форме, остывание на воздухе, термическая обработка) с диагностикой качества отливки, оптимизацией технологических параметров при заданных организационно-технических ограничениях, выдачей комплекта текстовых и графических технологических документов;

– «Полигон» (ЦНИИМ, г. Санкт-Петербург) – позволяет моделировать процессы затвердевания, образования усадочных раковин, микропористости, развития деформаций в интервале затвердевания; для некоторых сплавов описывает процессы формирования структуры и распределение механических свойств; имеет специализированные модули для анализа процессов заполнения формы при специальных видах литья, обработки экспериментальных данных для адаптации системы к условиям конкретного производителя литья;

– LVMFlow (Лаборатория математического моделирования, г. Ижевск) – система моделирования тепловых и гидродинамических процессов литья в реальных цеховых условиях для широкой номенклатуры сплавов, материалов формы при гравитационном литье и литье под давлением;

– ProCast (VES.Inc, США) – моделирование литья в песчаную форму, специальные способы литья различных сплавов; позволяет моделировать процессы заполнения формы, прогнозировать структуру большинства многокомпонентных промышленных сплавов, осуществлять расчет остаточных напряжений и пластических деформаций в отливке;

– MAGMASOFT (MAGMAGmb, ФРГ) – в базовом варианте моделирование литья в песчаную форму и кокиль, имеет дополнительные модули (литье под давлением, литье в безопасные формы, литье чугуна);

– AFS Solidification System (Американское общество литейщиков, США) – моделирование процессов литья в песчаную форму, по выплавляемым моделям, в кокиль, под давлением;

– EUCLID (MATRA, Франция) – система автоматизированного проектирования, подготовки производства и моделирования техпроцессов изготовления промышленных изделий, в частности отливок, практически любой сложности. Подсистема Simular позволяет моделировать процессы литья в песчаную форму, в кокиль, по выплавляемым моделям, самотёком или под давлением для отливок из стали, чугуна, алюминиевых, медных и жаропрочных сплавов.

Все эти системы дают возможность реализовать компьютерную разработку технологии производства отливок, моделирование литейных процессов, проектирование и изготовление литейной оснастки.

Из отечественных разработок в области систем автоматизированного моделирования литейных процессов хотелось бы выделить LVMFlow. На фоне относительной простоты освоения данная система предоставляет пользователю эффективный инструментарий для работы.

Отличительная черта LVMFlow – возможность моделировать заполнение полости формы расплавом с получением точных результатов, а также анализировать работу различных литниково-питающих систем.

САМ ЛП LVMFlow может использоваться для моделирования таких способов литья, как литье по выплавляемым моделям, литье в землю, в кокиль, изложницу, литье под давлением. Из дополнительных элементов оснастки, применяемых в литейной технологии, в LVMFlow рассматриваются теплоэлектронагреватели, каналы с теплоносителями, фильтры, противо-

пригарные покрытия. Предусмотрено моделирование многократного использования формы, что важно при литье в кокиль и под давлением.

Система LVMFlow предоставляет возможность получить распределение температурно-фазовых полей в отливке и форме, незатвердевшей жидкой фазы, полей скоростей и давлений, выявить места образования усадочных раковин и микропористости, а также проследить движение шлаковых частиц и определить места их скопления. Пользователь может оценить время затвердевания и получить параметры «модуля» отливки.

Применение подобных систем на практике, по нашему мнению, должно реализовываться в рамках концепции цифрового производства, дополняя методики быстрого прототипирования, по алгоритму: послойная печать полимеров, лазерное спекание порошков по SLS-технологии, использование ЧПУ при изготовлении литейной оснастки.

Существующий на сегодня опыт использования математического моделирования однозначно подтверждает высокую эффективность его применения для решения всех трех классов задач технологической подготовки производства отливок.

Список литературы

- [1] *Леушин И.О.* Моделирование процессов и объектов в металлургии. М.: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2013. 208 с.
- [2] *Леушин И.О., Решетов В.А., Петухов А.В.* Основы систем автоматизированного проектирования для литейщиков. Н. Новгород: НГТУ, 2002. 253 с.
- [3] *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
- [4] *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.

The Use of Mathematical Modeling in Technological Preparation of Foundry

Igor O. Leushin and Vladimir A. Reshetov

*Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
24 Minin Str., Nizhny Novgorod, 603950, Russia*

The basic principles of the system of mathematical modeling in the technological preparation of foundry and examples of these systems are presented. The necessity of integration the available packages of mathematical modeling in software complex computer-aided design (CAD) is showed.

Keywords: automation of technological preparation of production, foundry, mathematical modeling.
