

## ПРОГРАММЫ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ МЕТАЛЛОВ

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Главная задача при проектировании формы и технологического процесса литья металлов – избежать образования дефектов в отливке. К наиболее распространенным дефектам относятся раковины, «холодные» спаи, скопления загрязнений, нарушения кристаллической структуры металла, чрезмерные остаточные напряжения и т.д. Полностью избежать образования дефектов избежать обычно не удается по самой природе литья, поэтому необходимо сконцентрировать их в частях отливки, удаляемых при дальнейшей обработке.

Несмотря на многовековой опыт, получение сложной отливки без дефектов остается не тривиальной задачей. При традиционной технологии, если отливка получалась с браком, то изменяют геометрию форму или параметры литья, основываясь как на общих закономерностях технологии, так и, в значительной мере, на опыте и интуиции литейщика. Для сложной или тяжелой отливки отработка технологии литья могла длиться несколько месяцев, требуя при этом серьезных финансовых вложений.

Сегодня такой подход неприемлем. Одна из причин в том, что скрытый дефект отливки может привести к браку, который проявится только после механообработки. В этом случае убытки предприятия могут многократно превысить стоимость самой отливки, не говоря уже о потерянном времени. Кроме того, развитие глобализации привело к переводу значительной части реального производства в страны Юго-Восточной Азии (в первую очередь, Китай и Индию). В этой ситуации единственный путь получения приемлемой прибыли для европейских предприятий – это кардинальное сокращение времени выполнения заказа и сокращение расходов производства, при поддержании высочайшего качества литья. Поэтому в настоящее время не остается времени (и денег) на выпуск пробных партий и поэтапную отработку технологии литья сложной отливки, исключаяющей появление брака.

Решение этих проблем лежит на пути компьютерного моделирования литейных процессов. При компьютерном моделировании можно визуально, на экране монитора, смоделировать весь процесс изготовления отливки, включая заливку формы, кристаллизацию сплава и образования усадочных дефектов.

В настоящее время сформировались следующие основные задачи, которые призваны решать программы для моделирования литья металлов. Это:

- отработки сложных или ответственных технологий (как серийных, так и разовых);
- определения параметров, наиболее важных по влиянию на качество и выход годных изделий;
- нахождения причин брака в уже применяемых неудачных технологиях;
- определения устойчивости технологии к изменению внешних параметров;
- поиск новых технологических решений получения сложных отливок.

Умение корректного решения этих задач приобретает важное, а зачастую и решающее, конкурентное преимущество. Одна из причин этого в том, что использование компьютерного моделирования предполагает высокую культуру проектирования, и производства. В частности, использование моделирующих систем позволяет технологу изучить процессы, идущие в отливке и понять, по каким причинам образовывается тот или иной дефект в конкретной отливке при данных конкретных технологических параметрах, т.е. «увидеть» то, что в реальности он увидеть не может. В итоге использование технологом-литейщиком моделирующей системы существенно повышает его квалификацию, причем в достаточно короткое время. Поэтому все чаще заказчики на литейную продукцию в списке требований к производителю выдвигают требование об обязательном использовании компьютерного моделирования.

Моделирование литья включает в себя следующие типовые этапы. В первую очередь, должна быть подготовлена твердотельную модель отливки в любой САД-системе. К отливке

добавляется модель литниковой системы (стержни, холодильники и т.д.), а в ряде случаев, и модель формы для литья. Твердотельные модели обычно сохраняются в специальном промежуточном формате STL и передаются собственно в расчетный пакет, моделирующий литье. В дальнейшем полученная из CAD-пакета геометрия разбивается на сетку конечных элементов (или, в некоторых пакетах, конечно-разностную сетку).

Перед началом расчета задается марка литейного материала, его температура, давление впрыска; материал и температура формы, вид заливки. Исходя из выбранных материалов, автоматически задаются их теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость, скрытая теплота кристаллизации и их зависимости от температуры). Эти характеристики берутся из базы данных, но при необходимости их можно уточнить и «вручную». Аналогично, из базы данных автоматически задаются граничные условия «отливка – форма» (коэффициенты теплопередачи, излучения и т.д.).

Далее выполняется важнейший и наиболее длительный этап – гидродинамический расчет заполнения формы расплавом. В ходе его выполнения моделируется движение фронта расплава металла с учетом эффектов сжимаемости, турбулентности и теплопереноса. В ряде пакетов учитывается еще и движение вытесняемого воздуха и газов, выделившихся в процессе литья (например, при сгорании выплавляемой модели).

Одновременно выполняется термический расчет с целью определения тепловых потоков и температур в системе «отливка – форма – окружающая среда». В алгоритм теплового расчета заложен учет теплопередачи посредством теплопроводности, конвекции, излучения. При этом учитывается сложный характер теплообмена на границе «отливка-форма» с учетом прослоек (окислы, покрытия) и зазоров, а также выделение тепла при затвердевании и перехода металла в разные металлургические фазы. Параллельно определяется распределение температур и в самой форме.

Результатом совместного гидродинамического и теплового расчета является поля скоростей потока, давления и температур в любой момент заполнения формы. Анализ процесса заполнения формы сам по себе дает ценную информацию для оценки возможности образования и места расположения многих дефектов. Например, преждевременное затвердевание расплава в сужении, соединяющего различные области отливки, может привести либо к недоливу (рис. 1), либо к повышенной пористости стальной отливки.

Совместный расчет течения расплава и теплообмена позволяет также определить участки размывания песчаной формы, холодные спаи и другие дефекты заполнения, возможные места образования воздушных карманов или скопления частиц загрязнений и т.д. Но, главное, результаты гидродинамического и теплового расчета служат в качестве исходных данных для дальнейшего расчета показателей качества отливки.

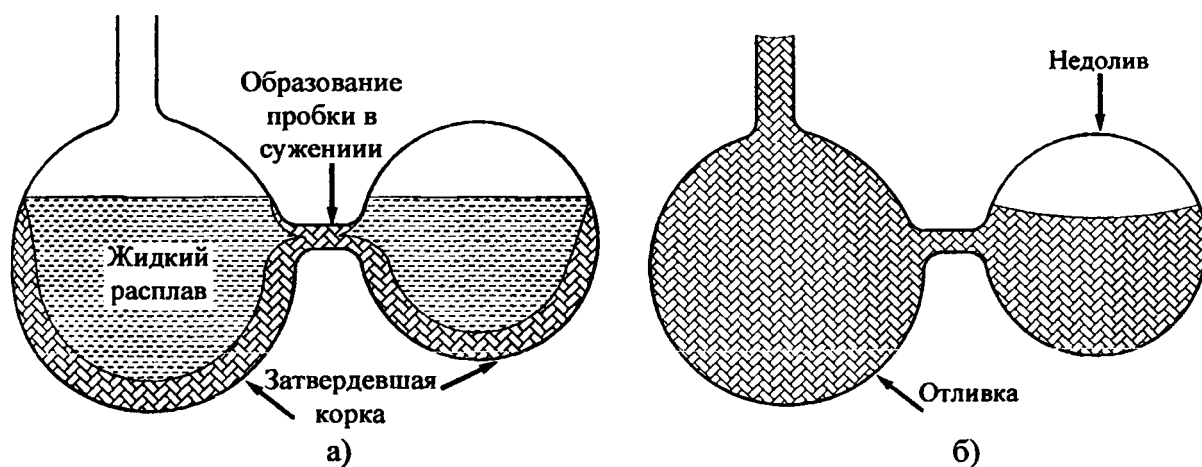


Рис. 1. Пример образования дефектов литья

Расчет распределение макропористости в отливке основан на вычислении объемной усадки металла в процессе застывания и движения зеркала расплава в каждой изолированной области. Расчет микропористости обычно ведется на основе критерия Нийяма.

Анализ изменений теплового поля при остывании позволяют определять микроструктуру и механические свойства отливки. Такой анализ позволяет прогнозировать с высокой точностью конечную форму отливки с учетом деформаций и остаточных напряжений, оценить степень коробления и даже усталостную прочность отливки. Кроме того, легко определить оптимальную температуру выемки отливки из формы, ниже которой не будет происходить деформация отливки и образование «горячих трещин».

Важнейшая характеристика пакетов для моделирования литья – это степень соответствия получаемых результатов реальным данным. Точность расчета в первую очередь зависит от того, насколько свойства фактически используемого материала и граничные условия на границе «отливка – форма» соответствуют параметрам, принятым в модели. Для уточнения значений параметров модели многие пакеты имеют специальные модули обратного моделирования, позволяющие по результатам пробных заливок «настроить» пакет на конкретный металл, фактическую технологию литья и т.д. Такой модуль позволяет определить конкретные параметры модели на основе замеров реальных температур и сравнения с их результатами виртуального моделирования. Определение искомых параметров производится путем минимизации разницы между рассчитанными и измеренными температурами в определенное время и на определенных участках анализируемой системы. Посредством такой автоматизированной процедуры возможно уточнение как граничных условий в системе «отливка — форма» (коэффициента теплопередачи, коэффициента теплоизлучения и т.д.), так и теплофизических характеристик материала (теплопроводность, теплоемкость, скрытая теплота кристаллизации и т.д.).

На сегодня в мире насчитывается более десяти систем автоматизированного моделирования литейных процессов. В Европе и США наиболее распространены ProCast (ESI Group, разработчики в США и Швейцарии) и MagmaSoft (разработчики в Германии). По данным производителей, за последние 10 лет было приобретено не менее чем 400–500 лицензий на каждую из этих программ по всему миру. В Европе более популярна система MagmaSoft, в США – ProCast.

MagmaSoft ([www.magma-soft.com](http://www.magma-soft.com)) – один из первых коммерческих пакетов для моделирования литья. Длительный опыт использования на литейных предприятиях по всему миру позволили ему приобрести репутацию простого, надежного и точного пакета. К сильным сторонам MagmaSoft относится его «инженерная» направленность, нацеленная на удобство работы специалиста именно в области литья, а не численных методов расчета. Например, есть отдельные модули для моделирования литья колесных дисков, литья в одноразовые формы с наклоном и поворотом, моделирования заливки из стопорного или чайникового ковша и т.д.

Для оценки показателей качества отливки широко используются критериальные методы, основанные, в том числе, и на многолетнем опыте сотен пользователей пакета. Используются как общеизвестные критерии (например, критерий Нияма для оценки микропористости), так и «фирменные», интегрированные в пакет. Базой для расчета значений критериев являются результаты конечно-разностного расчета течения и застывания расплава. Такой подход облегчает задачи моделирования типовых задач литья, хотя может затруднять получение точного решения в нетипичных ситуациях.

К недостаткам MagmaSoft следует отнести невысокую точность расчета литья тонкостенных отливок и литья в кокиль. Он также является одним из самых дорогих пакетов в своем классе (по критерию «цена/функциональность»). В целом MagmaSoft можно отнести к надежной, проверенной системе «среднего» класса, ориентированной на решение типовых задач литья.

ProCast ([www.esi-group.com](http://www.esi-group.com)) – это «тяжелая» универсальная система, предназначенная для решения задач литья любой сложности с максимально точным учетом всех действующих факторов. В отличие от MagmaSoft, в ProCast методом конечных элементов моделируются не только тепловые, гидродинамические и деформационные процессы, но и процессы кристаллизации. В первую очередь эта особенность важна при моделировании процессов литья (выращивания) лопаток для турбин различного типа.

Модуль гидродинамики в этом пакете может использоваться для расчета любого типа заполнения, вплоть до самых высоких скоростей течения, встречающихся при литье под давлением. Реализовано моделирование турбулентностей, течение сжимаемых и других неньютоновских жидкостей (пластмасса, восковые модели). Моделируется также процесс выжигания пены

горячим металлом, отвод образующихся газов и заполнение самой формы с учетом вентиляционных отверстий в металлических формах или отвода газов через стенки песчаной формы.

К особым достоинствам этого пакета следует отнести возможности учета сложных тепловых граничных условий (например, при направленном затвердевании лопаток). Возможно также моделировать многоцикловую работу пресс-форм, с учетом постепенного прогрева пресс-формы в процессе многократного повторения цикла «впрыск — затвердевание — выемка».

Модуль расчета напряжений позволяет вычислять как термические напряжения, так и напряжения, возникающие при взаимодействии отливки с формой и другой технологической оснасткой. Напряжения рассчитываются одновременно во всех областях геометрической модели (в отливке, форме, стержнях, холодильнике и т.д.) по упруго-пластичной или упруго-вязкопластичной модели. Учитывается зависимость свойств материалов (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести, кривая упрочнения) от температуры. Учитывается особенности контактного взаимодействия между отливкой и формой. При этом тепловое сопротивление на их границе является функцией имеющегося зазора, который может меняться в ходе расчета.

Интересной особенностью ProCast является модуль CAFE (Cellular Automated Finite Element — клеточный автомат на основе конечных элементов), который позволяет моделировать развитие кристаллической структуры отливки с момента зарождения первых кристаллов. В модуле применены стохастические модели, позволяющие определить размер зерна, расстояния между вторичными ветвями дендритов, фазы, радиус графитовых включений.

ProCast наиболее востребован при литье по выплавляемым или выжигаемым моделям, при литье в кокиль, а также при литье лопаток турбин.

К недостаткам ProCAST можно отнести то, что для полного использования возможностей системы требуется высокая квалификация специалиста-расчетчика, особенно в области анализа результатов.

На предприятиях СНГ наряду с ProCAST и Magmasoft наибольшее распространение получили российские пакеты — Полигон ([www.focad.ru](http://www.focad.ru), разработчик в настоящее время — ООО «Фокад», Санкт-Петербург) и LVMFlow ([www.mkmssoft.ru](http://www.mkmssoft.ru), на западном рынке называется NovaFlow, разработчик — ЗАО «НПО МКМ», Ижевск).

По мнению разработчиков, количество лицензий на Полигон в СНГ превышает число лицензий на все остальные литейные системы вместе взятые. За последние 10 лет было официально куплено более 50 промышленных лицензий на этот пакет. В последнее время ведется активная компания по внедрению этого пакета в учебный процесс большинства профильных вузов России и стран СНГ.

Особенностью пакета Полигон является то, что моделирование процессов образования усадочных дефектов — микропористости, макропористости и раковин решаются численными методами. При этом задачи прогноза прочности, твердости, структурных параметров отливки и т.п. решаются методами критериального анализа. Кроме того, интересной особенностью Полигона является возможность численного расчета распределения электрических потенциалов в затвердевающей отливке в условиях приложения электрического тока. Такая задача может возникнуть при некоторых способах литья лопаток.

Система Полигон позиционируется как альтернатива ProCAST, при значительно меньшей стоимости. Например, ориентировочная цена одной лицензии на ПОЛИГОН, со всеми модулями, без ограничения числа конечных элементов, с поддержкой 2-ядерного процессора — порядка 1.200.000 российских рублей. При этом за пределами СНГ пакет практически не известен.

Пакет LVMFlow (ранее назывался ЛВМ-3D) считается вторым по распространенности в СНГ и достаточно известным в мире (150 инсталляций в мире, 20 в СНГ). Самое главное достоинство LVMFlow заключается в модуле моделирования литья лопаток турбин. Вероятно, этот модуль один из лучших в отрасли (что косвенно подтверждается географией продаж). По остальным возможностям ближайшим аналогом ему может служить Magma.

Следует также отметить появление в СНГ еще одного «тяжелого» пакета FLOW-3D (США, [www.flow3d.com](http://www.flow3d.com)). Отличительной особенностью FLOW-3D является мощный и быстрый гидродинамический решатель, который позволяет с высокой точностью моделировать течение металла в литейной форме и достоверно предсказывать помимо прочих дефекты литья,

образующиеся на этапе заливки металла в форму, например, спай, окисные пленки, засоры, газовые раковины и пористость от замешивания воздуха в жидкий расплав.

В дополнение к перечисленным, на Западе широко используются более «легкие» (работающие на упрощенных алгоритмах) и, соответственно, более дешевые пакеты для быстрого моделирования литья. В качестве примера можно привести американский SolidCast (Finite Solutions, более 430 инсталляций в 40 стран мира, ранее назывался AFSolid), немецкий WinCast ([www.simtec-inc.com](http://www.simtec-inc.com), ранее называлась Simtec) или финский CastCAE. Эти пакеты в СНГ официально используются относительно редко.

Для оценки точности расчета, обеспечиваемого «легким» пакетом SolidCast, были отлиты шары Ø100 мм из чугуна разного химического состава. Для выявления усадочных дефектов шары разрезались пополам и протравливались 4%-м раствором  $\text{HNO}_3$ . Параллельно проводился расчет процесса литья, в частности, образования усадочной раковины. На рисунке 2 показаны геометрическая модель отливки и разрезы шаров с фактическими и смоделированными (показаны утолщенными линиями) усадочными раковинами. Эксперимент показал качественное и, в какой-то мере, количественное совпадение с результатами расчета. В частности, при моделировании изменяемые входные параметры дают одинаковое с экспериментом изменение размеров усадочных раковин.

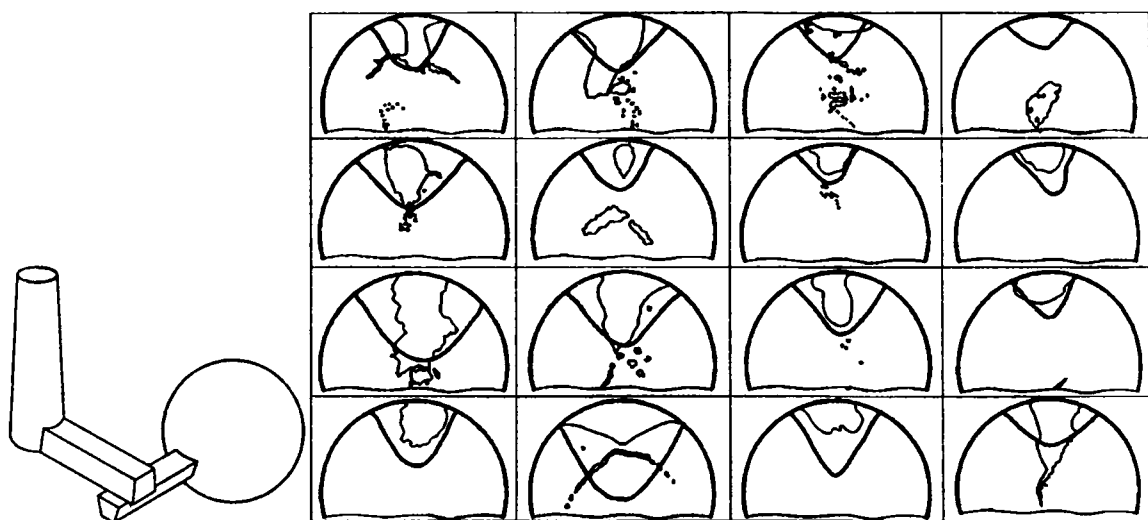


Рис. 2. Сравнение результатов компьютерного моделирования и фактически наблюдаемая усадочная раковина

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вольнов, И.Н. Компьютерное моделирование литейных процессов при производстве ТПА // Трубопроводная арматура и оборудование. – 2008. – №5(38). – С. 17...21.
2. Вольнов И. Н. Моделирование литейных процессов — современные вычислительные технологии // Литейщик России. — 2007. — № 11. — С. 27–30.
3. Вольнов И. Н. Системы автоматизированного моделирования литейных процессов — состояние, проблемы, перспективы // Литейщик России. — 2007. — № 6. — С. 14–17.
4. Тихомиров М.Д. Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов // Материалы научно-практического семинара «Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности». 17-19 мая 2004 г. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. – 118 с.