

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

ЭПИЗОД 1-Й.

РАБОТАЕМ В ProCAST

Введение

Статьи, посвященные математическому (оно же компьютерное) моделированию вообще и моделированию литейных процессов в частности, появляются в печати и сети Internet постоянно. Обсуждаемые в них вопросы, как правило, либо достаточно общие, либо слишком узкие. В первом случае — это поверхностное описание какой-либо программы с беглым перечислением модулей, функционала, возможностей и достигнутых с ее помощью успехов, что полезно для людей, которые ничего не знают о предмете, но желали бы расширить свой кругозор. Во втором — это описание математических моделей и методов, что тоже полезно, но в основном для людей, разбирающихся в предметной области.

Основную же массу пользователей программного обеспечения (ПО) составляют инженеры-технологии и инженеры-конструкторы предприятий, имеющих литейное производство, то есть специалисты, которых общие вопросы уже не интересуют, а узкоспециальные не касаются. Читая в сети Internet форумы, посвященные разным вопросам CAD/CAM/CAE, понимаешь, что специалистов, работающих, например, в "ПолигонСофт", интересует, как работает таким же специалистам в ProCAST или LVMFlow.

Так получилось, что занимаясь моделированием литейных процессов (сначала на предприятии, а затем в ГК CSoft), мне приходится использовать разные системы компьютерного моделирования

литейных процессов (СКМ ЛП). Это позволило не только сравнить их применимость, адекватность и функционал, но и оценить удобство работы в программе: операции с геометрическими и сеточными моделями, способы и особенности назначения граничных (ГУ) и начальных (НУ) условий и т.п.

Так появилась идея написать цикл статей, посвященных именно практической стороне моделирования, то есть вопросу "как это делается" в конкретной СКМ ЛП. Хочется быть беспристрастным, но, наверное, статьи все равно будут в большой степени субъективны, поскольку их напишет человек с определенными предпочтениями и представлениями о том, как должна работать программа для моделирования литейных процессов.

В этих публикациях не планируется проводить сравнение расчетных методов и моделей. Вечный спор: что лучше — метод конечных элементов (МКЭ) или метод конечных разностей (МКР) (либо метод контролируемого объема (МКО)) — оставим производителям ПО. Они ведут его давно, публикаций на эту тему достаточно.

Сегодня ГК "СиСофт" распространяет на территории России четыре СКМ ЛП (в скобках указаны компания-производитель и страна):

- ProCAST (ESI Group, Франция);
- QuikCAST (ESI Group, Франция);
- СКМ ЛП "ПолигонСофт" (ООО "Полигон", Россия);
- LVMFlow (НПО МКМ, Россия).

Это программы разного уровня сложности, разной ценовой категории и с ориентацией на разный уровень пользователей. Наиболее мощная или, как говорят, "тяжелая" из указанных систем — ProCAST, поэтому с нее и начнем.

Краткая характеристика ProCAST

Система ProCAST разработана в США компанией UES Inc. более 20 лет назад. В свое время эксперты NASA признали ProCAST наиболее мощной и корректной программой для расчета литейных процессов. В начале XXI века пакет был выкуплен французской компанией ESI Group. Одновременно в состав компании вошла швейцарская фирма Calcom, которая ранее занималась продажей ProCAST на территории Европы. Именно Calcom ESI продолжает развитие программы, начиная с версии ProCAST 2004.0. В этой статье мы опишем работу с новейшей версией программы — ProCAST 2008.0.

Основа ProCAST — это три решателя (Solvers): гидродинамический (Flow Solver), тепловой (Thermal Solver) и решатель напряжений (Stress Solver). В качестве дополнительных опций предлагается внушительный список модулей, расширяющих базовые возможности программы (рис. 1).

Почти все модули ProCAST используют для решения соответствующих дифференциальных уравнений МКЭ. Исключение составляет модуль расчета газовой и микропористости (Advanced Porosity Module), использующий МКР и модуль

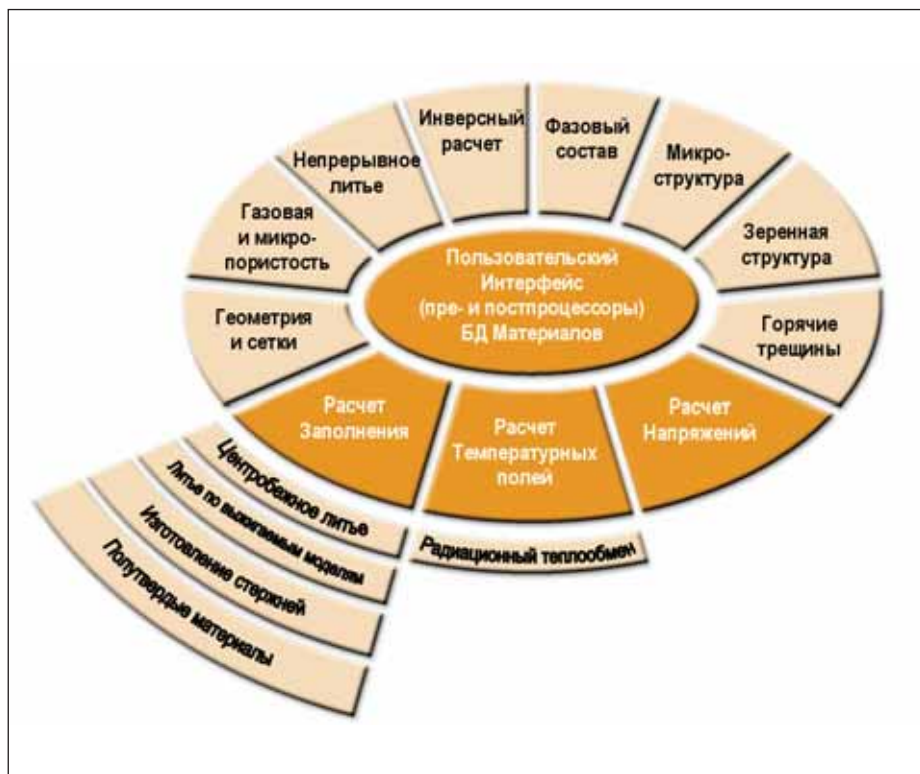


Рис. 1. Модульная структура СКМ ЛП ProCAST



Рис. 2. КЭ-модель литейного блока, полученная в CAD-системе Unigraphics (ОАО «Салаватнефтемаш»)

расчета процесса зарождения и роста зеренной структуры (CAFE), сочетающий в себе МКЭ и клеточные автоматы.

С практической точки зрения, использование МКЭ означает, что перед инженером встает дополнительная задача, связанная с подготовкой расчетной конечно-элементной модели. Поэтому мы более подробно остановимся на пре-

процессорном модуле — генераторе сеток MeshCAST.

MeshCAST как лучший генератор

Все, кто когда-либо создавал конечно-элементные (КЭ) модели, знают, как это непросто. Особенно когда речь идет о моделировании литейных процессов. Если расчетная область состоит больше

чем из одного тела, сразу начинаются проблемы, связанные с требованием совпадения узлов сеток на сопрягающихся границах. Впрочем, сейчас почти все СКМ ЛП позволяют обходить это требование и допускают несовпадение узлов. Но для большей точности расчета лучше, чтобы сетки совпадали.

Хорошие генераторы сеток существуют. Например, в модуле Advanced Simulation CAD-системы Unigraphics (теперь это продукт NX от Siemens PLM Software). Его генератор сеток позволяет с минимальными усилиями получить 3D-сетку переменного размера на системе тел. Условия сопряжения сеток можно задать в ручном и автоматическом режиме (рис. 2).

Некоторые производители СКМ ЛП рекомендуют генератор сеток от фирмы Altair Engineering — известный HyperMesh. Сам генератор очень неплох, но геометрия (как правило, в формате IGES) часто передается с ошибками, ее исправление занимает много времени или вовсе невозможно. Да и сам процесс получения сопряженных сеток, прямо скажем, не из легких.

Часто задача получения КЭ-модели не ограничивается разбивкой двух состыкованных тел (как на рис. 2). Кроме модели блока может потребоваться получить КЭ-модель керамической формы (для ЛВМ) с утеплением одним или несколькими слоями теплоизоляции (в общем случае утепление может быть неравномерным). При моделировании литья в землю потребуются построить КЭ-модели формы, стержней, холодильников и т.п. Все эти элементы придется построить в CAD-системе, затем транслировать в генератор сеток, где предстоит нелегкое решение проблемы совпадения узлов на сопряженных поверхностях, которых может быть и 500! В HyperMesh такая процедура может занять два-три дня работы.

Когда начинаешь готовить КЭ-модель в генераторе MeshCAST, состояние счастья приходит очень быстро. Например, для моделирования процесса ЛВМ в CAD-системе требуется создать только модель литейного блока. Все остальные тела (форма, вата, стержни) будут сгенерированы в MeshCAST сразу в виде КЭ сетки. Для литья в землю сопряжение сеток на границах "отливка-форма" тоже перестает быть проблемой.

Работа в MeshCAST состоит из трех этапов:

- загрузка геометрических моделей и работа с ними;
- работа с поверхностными сетками;
- создание объемной сетки.

На первом этапе в MeshCAST можно транслировать геометрические модели

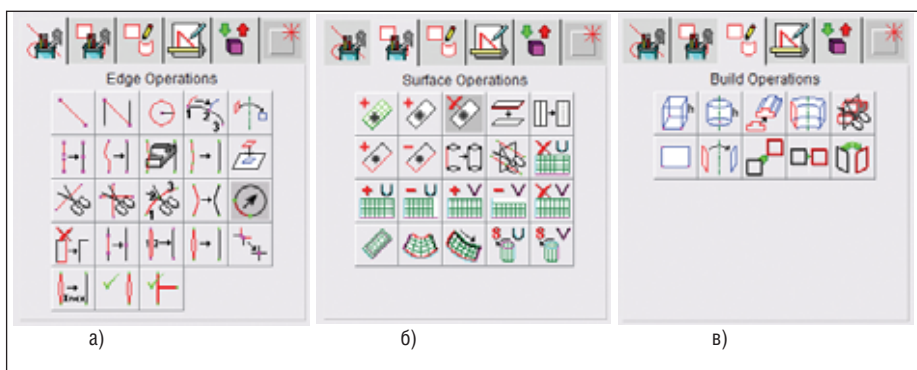


Рис. 3. Инструментарий для операций с геометрией: а) ребрами, б) поверхностями, в) телами

в форматах IGES, STEP и Parasolid. Формат Parasolid читается, как правило, без ошибок, модель в формате IGES, скорее всего, придется исправлять. Для исправления геометрии прилагается внушительный набор инструментов (рис. 3)

Избежать правки геометрии можно, если импортировать в MeshCAST модели в формате STL. Нажатием одной кнопки модель преобразуется в 2D-сетку. Качество преобразования в некоторых случаях может быть средним, потребуются редактирование сетки, но иногда этот вариант бывает настоящим спасением.

Если проверка геометрии дает положительный результат, можно переходить к генерации поверхностной сетки. Это совершенно не сложная операция: задаем средний размер элемента, нажимаем кнопку — и все готово. В общем случае, на

каждой поверхности можно задать индивидуальный размер элемента. Поскольку MeshCAST ориентирован на моделирование литья, он сам позаботится о сопряжении сеток, сам проследит, чтобы качество полученной сетки удовлетворяло требованиям алгоритмов решателей ProCAST.

Если ваша CAD-система не поддерживает формат Parasolid, но может генерировать поверхностную или объемную сетку, то лучше использовать эту возможность — проблем сразу станет меньше. В этом случае переходим сразу ко второму этапу — работе с поверхностными сетками. В MeshCAST можно импортировать объемные и поверхностные сеточные модели в форматах NASTRAN, PATRAN, I-DEAS и Ansys.

На втором этапе работы в MeshCAST происходит редактирование (исправление) поверхностных сеток и генерирование сеточных оболочек. Редактировать приходится, как правило, сетки,

импортированные из других генераторов, поскольку их качество может не удовлетворять требованиям MeshCAST. Набор инструментов для редактирования позволит работать с сеткой самого неудачного качества (рис. 4) — имеются практически все функции, используемые в сеточных генераторах высокого уровня. Например, при сравнении с тем же HyperMesh ощущается нехватка только функции совмещения узлов *Replace*. Зато процедура поиска дефектов сетки в MeshCAST (свободные ребра, "плохие" элементы и т.п.) заслуживает самой высокой оценки, она явно оптимизирована для сложной геометрии тел, что крайне актуально при моделировании ЛП. Многофункциональная кнопка *Check Mesh* выделяет все дефекты сетки красным цветом и делает их видимыми, даже если они находятся на внутренних поверхностях. Функция *Clip* обеспечивает возможность "откусывать" выделяемые куски сетки, позволяя заглянуть в самые недоступные места.

После необходимой коррекции исходных сеток можно сгенерировать дополнительные поверхностные сетки-оболочки, которые будут имитировать поверхности керамической формы или теплоизоляции. MeshCAST имеет целых три алгоритма для создания оболочек. Порядок работы очень простой: отмечаются элементы, для которых создание оболочки не требуется (плоскости симметрии, верхняя поверхность заливочной чаши и т.п.), задается толщина будущей оболочки (например, толщина керамической формы), запускается генератор.

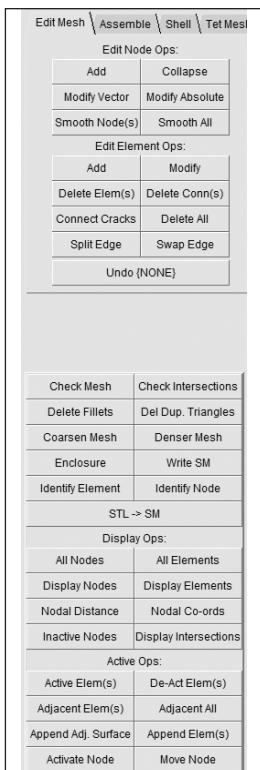


Рис. 4. Инструментальная панель для работы с 2D-сетками

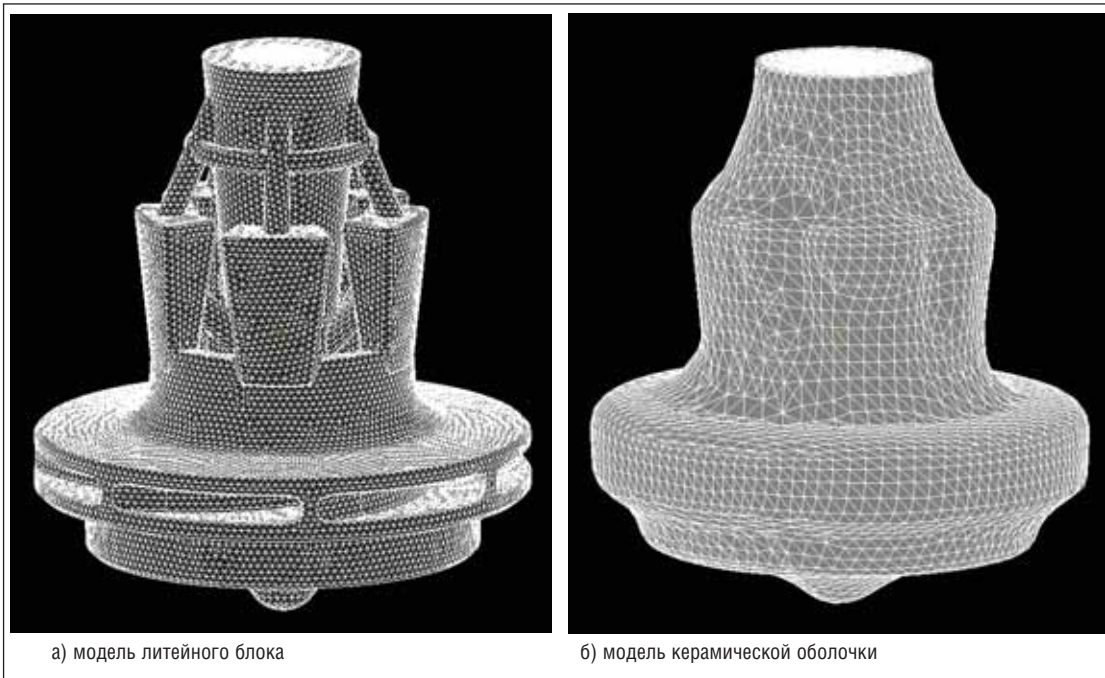


Рис. 5. Термодинамическая база данных: а) на вкладке "Composition" задается химический состав сплава; б) вывод результатов расчета распределения доли твердой фазы

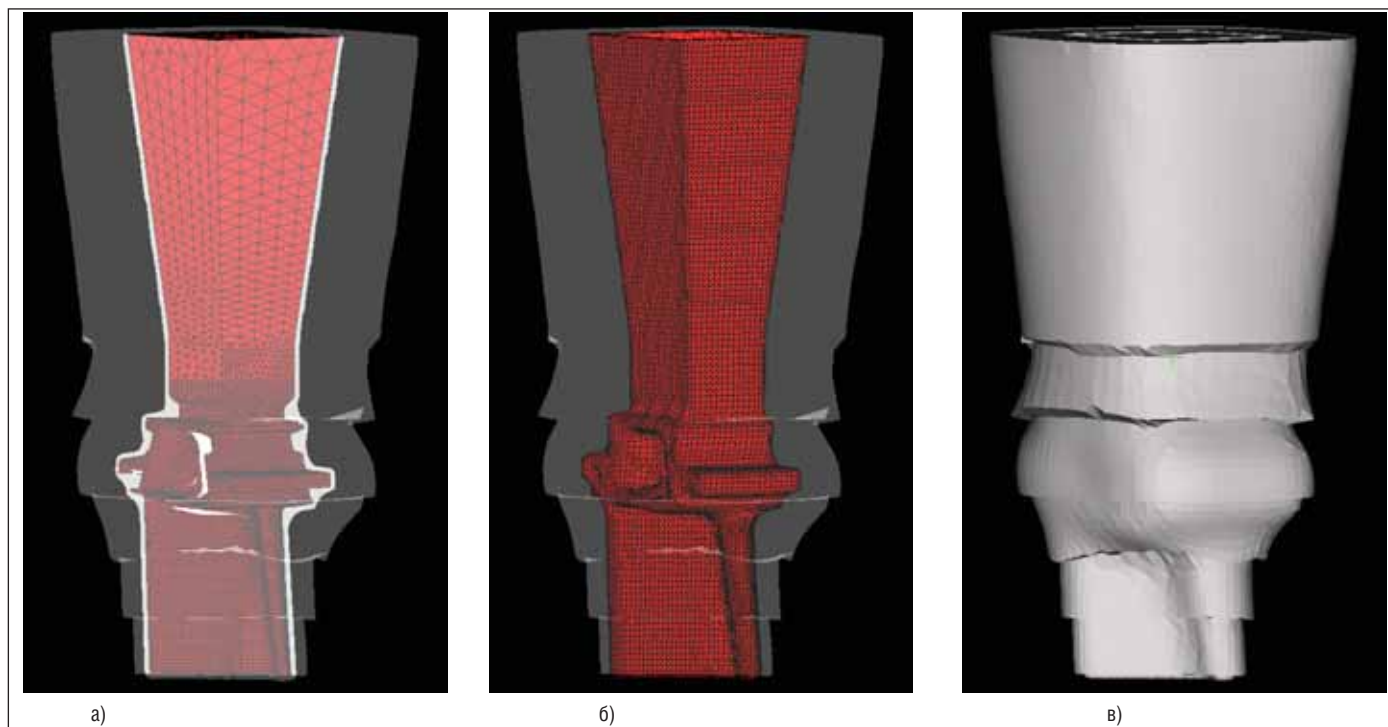


Рис. 6. Литейный блок "лопатка": а) модель блока; б) сетка керамической формы; в) шесть слоев теплоизоляции (ОАО "НПО "Сатурн")

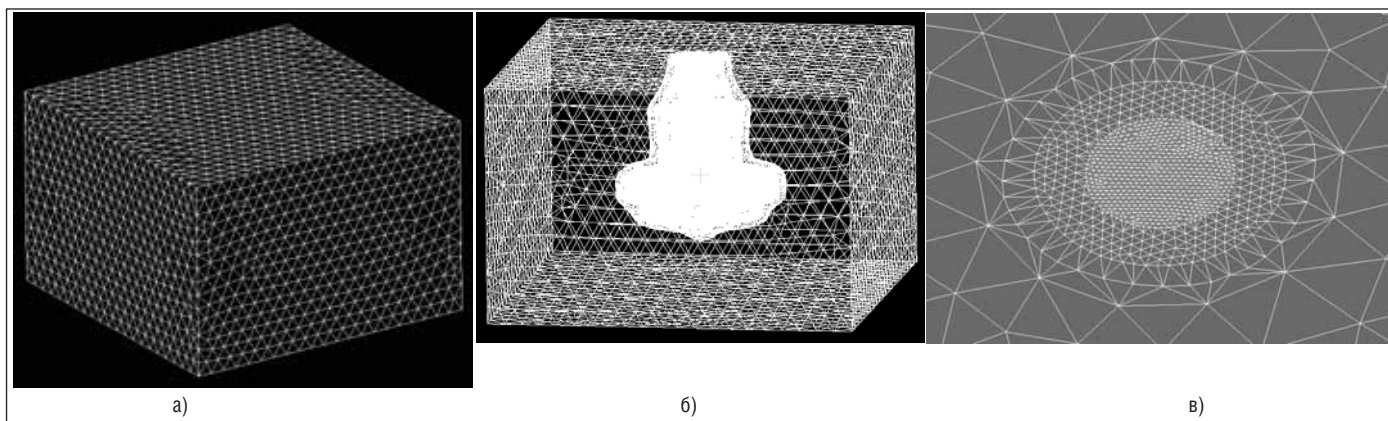


Рис. 7. КЭ-модель блока для ЛВМ, помещенная в опоку с песком:

а) сеточная модель засыпки (песок); б) результат сложения сеток; в) обработка пересекающихся сеток

Через минуту наблюдаем результат. И опять-таки все оптимизировано для моделирования литья: полученная оболочка обладает характерными чертами реальной керамической формы (рис. 5). Дополнительная опция *Holes/Gaps* задаст более тщательную работу алгоритма около щелей и отверстий, но качество полученной сетки может сильно пострадать. Повторив операцию, можно создать оболочку, имитирующую слой теплоизоляции и т.п. Правда, если требуется смоделировать частичное утепление формы, придется потрудиться: вручную "отрезать" лишнюю сетку, а оставшееся "пришить" по месту. Зато результат впечатляет (рис. 6).

Усложним задачу и предположим, что сгенерированную для блока форму (рис. 5) надо установить в опоку и засы-

пать песком. Моделирование песка в CAD-системе в таком случае невозможно, поскольку геометрия формы заранее неизвестна, следовательно, неизвестны поверхности контакта песка с формой. Решение непростой задачи становится почти элементарным с использованием MeshCAST. Все что нужно сделать — это построить в CAD-системе параллелепипед нужных размеров, загрузить его в генератор и построить на его поверхностях сетку. После этого с помощью функции *Boolean* объединяем новый файл сетки песка с ранее созданной сеточной моделью блока в форме. Функция сама определит пересекающиеся сетки, удалит пересечения и выполнит стыковку на границах (рис. 7).

К сожалению, алгоритм функции *Boolean* не всегда работает безотказно, мо-

жет потребоваться ручная работа по исправлению содеянного. Но в любом случае будет сэкономлено много времени.

О последнем этапе подготовки КЭ-модели расчетной области писать особенно нечего. Надо нажать кнопку *Generate Tet Mesh* и пойти выпить чаю, поскольку процесс может занять какое-то время. Достаточно, чтобы выпить чашечку...

Возможности MeshCAST не исчерпываются описанными в этой статье, здесь указаны лишь функции, наиболее востребованные при моделировании ЛП с использованием МКЭ. В целом же можно сказать, что MeshCAST — прекрасный, не имеющий аналогов генератор КЭ сеток, полностью ориентированный на моделирование литейных процессов.

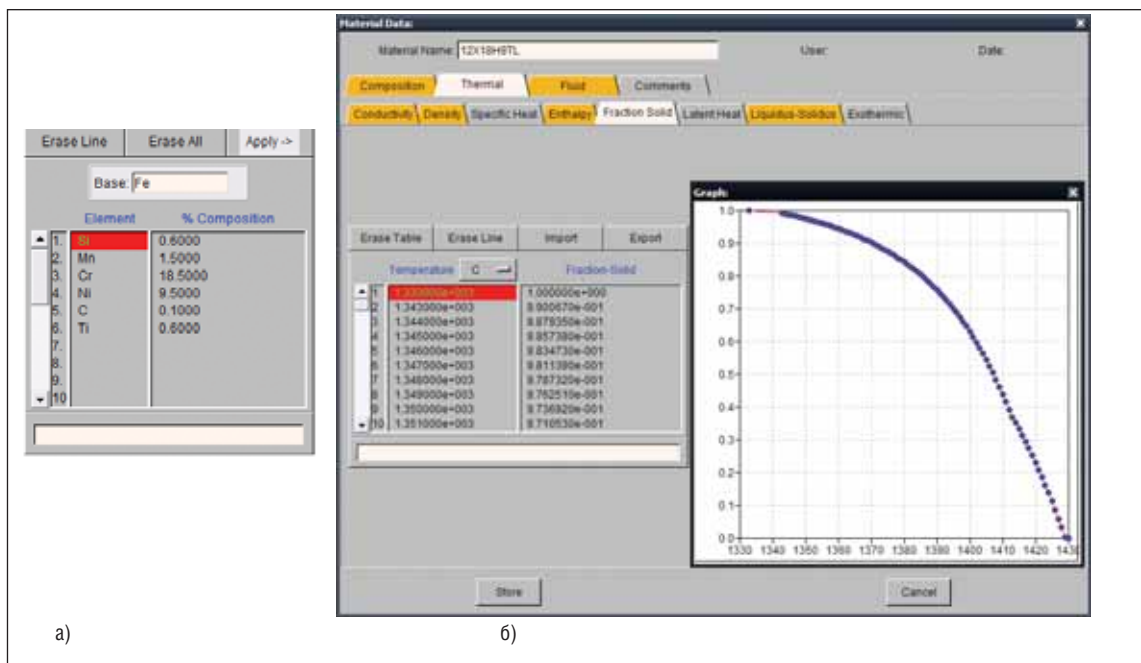


Рис. 8. Термодинамическая база данных: а) на вкладке "Composition" задается химический состав сплава; б) на вкладке "Fraction Solid" выводятся результаты расчета

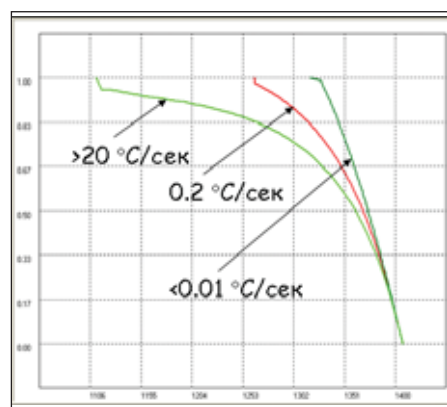


Рис. 9. Температурные зависимости доли твердой фазы, полученные при разных скоростях охлаждения

Подготовка к расчету

После генерации КЭ сетки расчетной области начинается ее подготовка к расчету. Суть подготовки заключается в присвоении элементам расчетной области свойств (тепловых, усадочных, деформационных и др.) требуемых материалов и задания ГУ и НУ. Эти операции проводятся в препроцессоре PreCAST.

Хотя ProCAST — узкоспециализированная система для литейщиков, работа с модулем PreCAST требует достаточно глубокого понимания смысла моделируемого процесса, поскольку терминология диалоговых окон, в которых назначаются материалы, ГУ и НУ лежат в области физики, а не технологии. Технологию это покажется сначала непривычным, но со временем приходит понимание того, что именно так и должно быть. Тем более что руководство пользователя на более чем семистах страницах дает достаточно подробные разъяснения. "Физичность" и

полный контроль над параметрами делают ProCAST очень гибким, и это невозможно не оценить.

Говоря о подготовке модели к расчету, необходимо подробнее остановиться на некоторых моментах, от которых зависит весь процесс моделирования.

Назначение материалов. Качество свойств материалов, назначаемых каждому объему расчетной области, оказывает непосредственное и очень сильное влияние на достоверность расчетов. Одновременно с этим нахождение этих свойств крайне трудная задача.

Например, для проведения расчета заполнения формы расплавом с последующим его остыванием до температуры солидуса (T_s) необходимы следующие достоверные данные о материале отливки: вязкость, коэффициент теплопроводности, плотность, энтальпия, доля твердой фазы. В общем случае требуется задать температурные зависимости параметров, где температура меняется от температуры заливки до T_s и ниже. Такие теплофизические данные для определенной марки сплава невозможно найти ни в литературе, ни в нормативной документации, ни в паспорте на сплав. Обычно их получают или экспериментальным, или расчетным путем. В первом случае требуются дорогостоящие экспериментальные установки, во втором — не менее дорогостоящее специальное программное обеспечение.

Для избавления инженера от необходимости решения столь трудноразрешимой проблемы в состав ProCAST включены шесть термодинамических баз данных компании CompuTherm LLC (США), с помощью которых можно рас-

считать свойства сплавов на основе Al, Fe, Ni, Ti, Mg, Cu. Введя химический состав сплава, пользователь получает все необходимые свойства для расчета заполнения формы расплавом и тепловой задачи, а также часть свойств для расчета напряжений (рис. 8). При расчете свойств учитывается эффект микросегрегации (диффузии в твердой фазе), который можно задать, используя три модели: "Lever" (правило рычага) — полное перемешивание, "Scheil" — полное отсутствие диффузии и "Back Diffusion" — средний вариант между "Lever" и "Scheil". Характер протекания диффузии зависит от скорости охлаждения, что учитывается при расчете свойств (рис. 9).

Термодинамические базы данных в ProCAST эволюционируют, что может привести к разнице в свойствах, полученных для одного и того же химического состава в разных версиях программы. Однако поскольку все предыдущие версии баз данных доступны, у пользователя есть возможность проследить все изменения и выбрать наиболее верный вариант. Лучший способ оценки правдоподобности рассчитанных свойств — это, конечно, сравнение с экспериментальными данными.

Граничные и начальные условия. Гибкость и прозрачность ProCAST при назначении граничных и начальных условий позволяет наиболее полно и точно описать моделируемый технологический процесс на всех его стадиях. Единственное, что требуется от пользователя — это четкое понимание физической сути процесса, от чего будет зависеть результат расчета, а между тем ProCAST не дает никаких подсказок. Но можно смело у-

Symmetry
Periodic
Accordion
Temperature
Heat
Velocity
Pressure
Inlet
Wall
Vent
Inject
Turbulence
Displacement
Point Load
Surface Load
Current Density
Voltage
Magnetic Potential
Nucleation

Рис. 10. ГУ, задаваемые на поверхностях

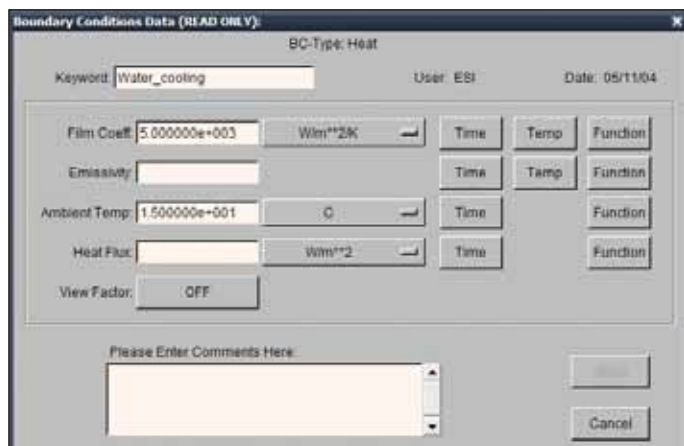


Рис. 11. Граничное условие типа "Heat" (Тепло)

верждать, что система готова исполнить практически любые пожелания пользователя. Список ГУ, которые можно задать на поверхностях отливки и формы (рис. 10), позволяет тщательно смоделировать любые литейные процессы, включая самые экзотические. Кроме того, можно задать ГУ в объеме и на поверхностях окружающих тел.

Параметры любого граничного условия могут быть заданы константами, функциями температуры и времени с использованием разных систем единиц.

Если же пользователя вдруг не устроит ни один из трех способов, практически любой параметр он может задать функцией, которую определяет сам (кнопки *Function* на рис. 11). Выбранный параметр будет изменяться в зависимости от температуры, времени, координат и т.п. по закону, который определяется через функцию, написанную пользователем на языке C и подключаемую к расчету через модуль "User Functions". Эта возможность используется, например, при моделировании направленной кристаллизации с жидкометаллическим охладителем (НК с ЖМО).

Начальные условия (например, начальная температура отливки и формы) могут быть заданы константами или полями, загружаемыми из других расчетов.

Параметры расчета. Последнее, что нужно сделать перед началом расчета, это задать параметры решателей, то есть определить момент остановки расчета, шаг расчета, параметры расчета усадки и т.п. (рис. 12). Вообще, параметров много и вряд ли когда-то придется воспользоваться хотя бы половиной из них. Это все та же идеология открытости ProCAST, позволяющая пользователю залезать в самые дебри алгоритмов системы. На тот случай, если настройки системы сбиты и восстановить их нет никакой возможности, есть готовые наборы параметров расчета, задающих общий характер вычислений (например, "литье

в землю"). При желании пользователь может создать свой набор, упрощая себе в будущем работу на этом этапе.

Удивительно, что при таком обилии изменяемых параметров это далеко еще не все возможности воздействия на работу ProCAST. Читая руководство пользователя, то и дело натываешься на новые и новые параметры, которые надо вводить вручную прямо в текстовый файл. Поэтому руководство надо читать. Еще большее удивление вызывает наличие в ProCAST некоторого количества недокументированных (но очень полезных) параметров.

В модуле ViewCAST кроме просмотра можно проводить математическую обработку температурных полей и получать разную полезную информацию для повторного расчета с уточненными параметрами

С некоторых пор в ProCAST появились модули, для которых исходные данные вводятся не в препроцессоре PreCAST, а либо в другом приложении (модуль CAFE), либо в текстовый файл (Advanced Porosity Module). Это неудобство связано с тем, что производители стремятся как можно быстрее предоставить пользователям новые модели для промышленного использования. К факту продажи несколько "сырых" модулей можно относиться по-разному, однако нельзя отрицать постоянные усилия раз-

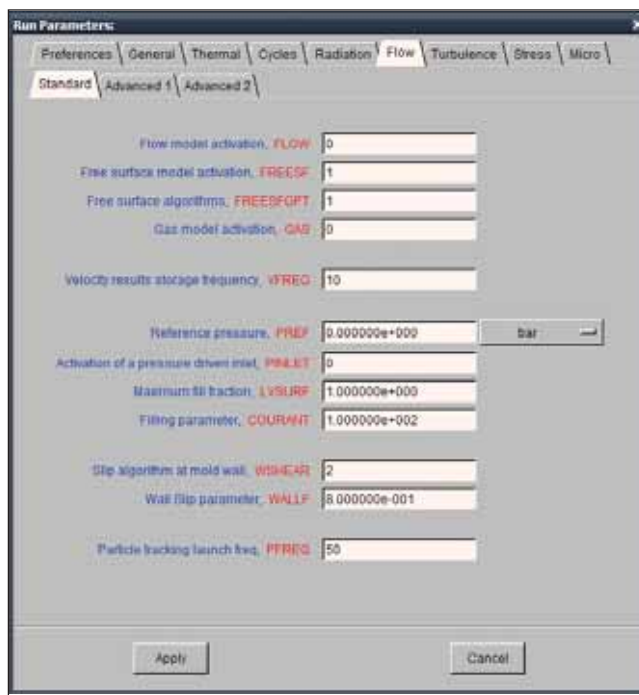


Рис. 12. Параметры расчета задачи заполнения

работчика ПО, направленные на их улучшение.

Результаты расчетов

Поскольку о самом расчете в ProCAST писать особенно нечего, сразу переходим к просмотру результатов. Модуль постпроцессора ViewCAST обладает богатым функционалом и предоставляет пользователю всю необходимую информацию в виде полей (температурные, пористость и т.д.), векторов (скорости, тепловые потоки) и графиков. Некоторые варианты представления результатов показаны на рис. 13 и 14.

В модуле ViewCAST кроме просмотра можно проводить математическую обработку температурных полей и получать разную полезную информацию для повторного расчета с уточненными параметрами.

Например, можно вычислить скорость охлаждения (скорость достижения заданной температуры) отливки и произвести коррекцию свойств сплава, используя модель "Back Diffusion". Повторный расчет с использованием скорректированных свойств даст более точный результат.

Соответствующей обработкой температурных полей можно получить параметр "Feeding Length" (длина питания), который играет важную роль при расчете усадочной пористости (стандартная модель). Также можно вычислить расстояние между вторичными осями дендритов — параметр, необхо-

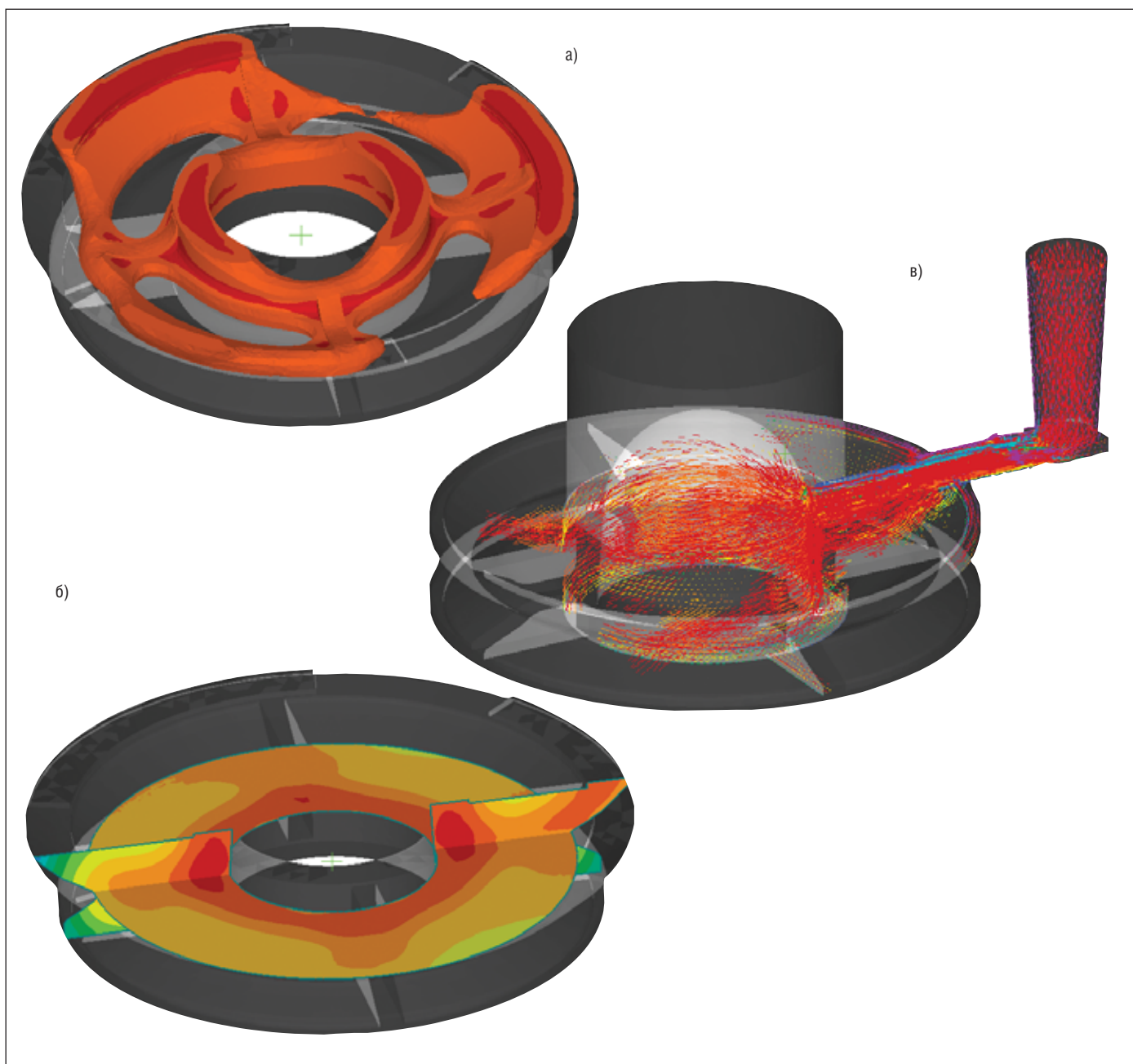


Рис. 13. Вывод результатов: а) режим изоповерхности; б) режим сечения; в) векторное поле скоростей (ОАО «Салаватнефтемаш»)

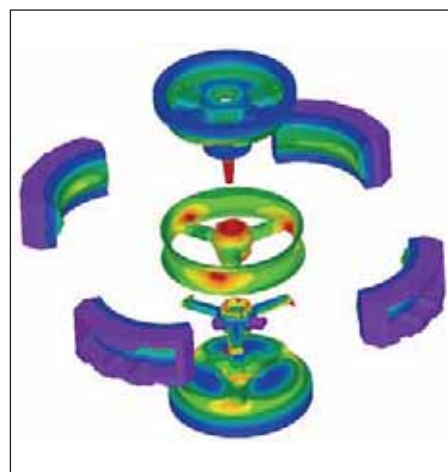


Рис. 14. Режим смещения материалов

димый для расчета микропористости в Advanced Porosity Module. По желанию можно узнать число Ниями и много другое.

В целом можно сказать, что, создавая ProCAST, производители старались максимально снизить количество "белых пятен" — трудноопределяемых параметров, необходимых для расчета.

Заключение

Невозможно описать всё в рамках одной статьи. Даже беглое перечисление всех возможностей ProCAST займет много места. Впрочем, цель статьи — подчеркнуть особенности программы, указав то, что отличает ее от других СКМ ЛП, а не голое перечисление функционала.

Оценивая систему в целом, можно сказать следующее. ProCAST — мощная, гибкая система с огромным набором возможностей. Некоторые литейные процессы (ЛГМ, центробежное литье, НК с ЖМО и др.) могут быть адекватно смоделированы только с помощью этой программы. Генератор сеток MeshCAST, генератор свойств материалов отливки, User Functions, множество специальных модулей делают ProCAST действительно уникальным.

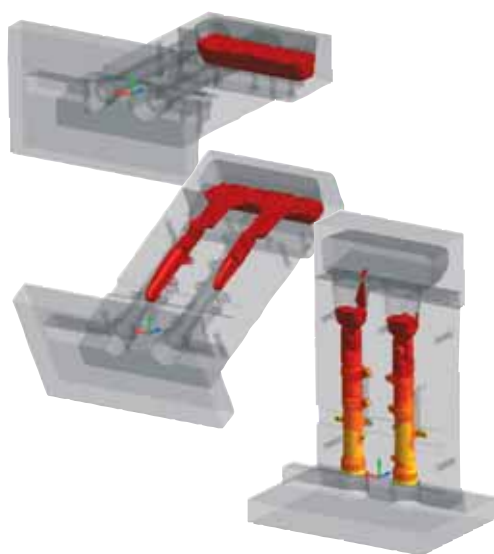
Кто же ближайший конкурент такой мощной системы? Об этом читайте в следующем номере.

Алексей Монастырский
CSoft
Тел.: (495) 913-2222
E-mail: avmon@csoft.ru

ПЕРЕДОВЫЕ РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПОВЕДЕНИЯ КОНСТРУКЦИЙ



ЛИТЬЕ МЕТАЛЛОВ



Услуги наших специалистов

- анализ и оптимизация литейной технологии (*выявление причин возникновения дефектов, проверка решений по их устранению*)
- разработка и корректировка литниково-питающих систем (*минимизация ваших затрат при внедрении новых технологий и выпуске новых изделий*)
- оценка работы оборудования (*моделирование работы нагревательных и плавильных печей, термостатов и т.п.*)
- конструкторские работы (*создание 3D-моделей литейных блоков и сеточных моделей для расчета*)

Техническая поддержка

- выбор системы моделирования и ее комплектации (*наиболее подходящей условиям вашего производства по соотношению "цена/качество"*)
- обучение специалистов (*теория и практика моделирования на отливках заказчика*)
- бесплатные тестовые расчеты и опытная эксплуатация (*попробуйте прежде чем платить*)
- бессрочная техническая поддержка (*все необходимое для работы, бесплатные консультации и дополнительное обучение*)

Программы для моделирования литейных процессов



Наши специалисты
окажут
помощь
в моделировании
других
процессов:



Расчеты
конструкций



Сварка



Валковая
формовка



Гибка
и гидроформовка



Штамповка

CSsoft
группа компаний

Москва, 121351,
Молодогвардейская ул., д. 46, корп. 2
Тел.: (495) 913-2222, факс: (495) 913-2221
Internet: www.csoft.ru E-mail: sales@csoft.ru

Владивосток (4232) 22-0788
Волгоград (8442) 94-8874
Воронеж (4732) 39-3050
Днепропетровск 38 (056) 749-2249
Екатеринбург (343) 379-5771
Казань (843) 570-5431
Калининград (4012) 93-2000
Краснодар (861) 254-2156
Нижний Новгород (831) 430-9025
Новосибирск (383) 362-0444

Омск (3812) 31-0210
Пермь (342) 235-2585
Ростов-на-Дону (863) 206-1212
Самара (846) 373-8130
Санкт-Петербург (812) 496-6929
Тюмень (3452) 75-7801
Уфа (347) 292-1694
Хабаровск (4212) 41-1338
Челябинск (351) 265-6278
Ярославль (4852) 42-7044