

# CAD

ЖУРНАЛ  
ДЛЯ ПРОФЕССИОНАЛОВ  
В ОБЛАСТИ САПР

# master

2-3(47-48)'2009

[www.cadmaster.ru](http://www.cadmaster.ru)

**TechnologiCS на  
машиностроитель-  
ном предприятии**

**Теория и реальное  
проектирование  
в Model Studio CS**

**Внедрение  
системы  
электронного  
архива: быстро  
и эффективно**

**Bentley Systems –  
моделирование  
и эксплуатация  
наружных сетей  
водоснабжения  
и канализации**

**PLANT-4D – путь  
к успеху**

**3D-виды и 3D-  
документация  
в ArchiCAD**

**Автоматизация  
проектирования  
систем  
безопасности  
в nanoCAD ОПС**



# Моделирование литейных процессов

ЭПИЗОД 2-Й.

"ПОЛИГОНСОФТ" КАК ОН ЕСТЬ

## Введение

В предыдущем номере [1] начат цикл статей, посвященных практической стороне моделирования литейных процессов. В этом цикле описываются основные приемы и особенности работы в разных СКМ ЛП, без сравнительного анализа математических моделей и методов.

Группа компаний CSoft 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).

Эти программы разного уровня сложности, разной ценовой категории и с ориентацией на разный уровень пользователей. Начав с наиболее мощной из указанных систем – ProCAST [1], кажется логичным перейти к описанию наиболее близкой к ней системы. В нашем списке это СКМ ЛП "ПолигонСофт".

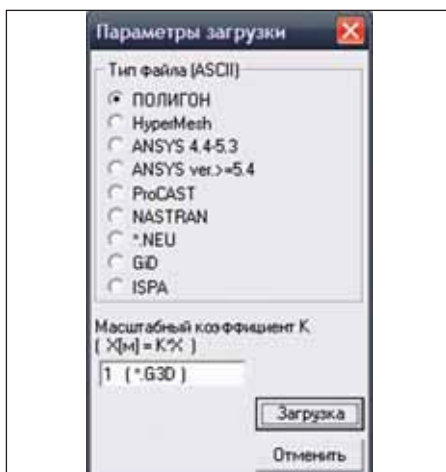


Рис. 1. Форматы файлов, доступные для загрузки в модуль "Мастер-3D"

## Краткая характеристика

Первая версия СКМ ЛП "ПолигонСофт" (старое название – САМ ЛП "Полигон") разработана в 1989 году в Центральном научно-исследовательском институте материалов (ЦНИИМ, Санкт-Петербург) по тематике Министерства оборонной промышленности. До сих пор это единственная конечно-элементная СКМ ЛП в России. С помощью системы можно моделировать все традиционные способы литья металлов:

- литье в песчаную форму с любым связующим;
- литье в кокиль (в том числе охлаждаемый);
- литье по выплавляемым моделям;
- литье по процессу вакуумно-пленочной формовки;
- литье под давлением;
- литье под низким давлением;
- жидкая штамповка (литье с кристаллизацией под давлением);
- затвердевание с учетом подвода электрического тока;
- направленное затвердевание в вакуумных печах при лучистом теплообмене.

Разработчики утверждают, что при умелом использовании можно получить приемлемые результаты для литья по газифицируемым моделям и центробежного литья, хотя специальные модели в системе отсутствуют.

Одно из несомненных преимуществ "ПолигонСофт" – модель усадочной макро- и микропористости, которая позволяет прогнозировать образование дефектов в отливках ответственного назначения (рабочие и сопловые лопатки ГТД, моноколеса, крыльчатки насосов и т.п.). Долгое время эту модель можно было назвать самой передовой и точной в мире. И сегодня СКМ ЛП "ПолигонСофт" ус-

пешно конкурирует с лучшими мировыми СКМ ЛП, проигрывая им по функциональности, но не по точности прогноза усадочных дефектов.

В настоящее время разработкой системы занимается ООО "Полигон". В статье описана последняя на текущий момент версия – "ПолигонСофт" 13.0 xCore.

## Подготовка к расчету

Подготовка к расчету включает в себя подготовку сеточной модели расчетной области, определение граничных (ГУ) и начальных (НУ) условий. "ПолигонСофт" имеет целых четыре препроцессорных модуля:

- "Мастер-3D" – работа с сеточной моделью;
- "Сплав" – управление ГУ и НУ;
- "Оптим" – оптимизация КЭ-модели для расчета прямым методом;
- "Трассировка" – подготовка специального файла геометрии для расчета радиационного теплообмена с учетом эффектов переизлучения и затенения.

В предыдущей статье [1] говорилось, что использование МКЭ подразумевает решение задач, связанных с подготовкой расчетной конечно-элементной (КЭ) модели. Например, ProCAST имеет для этого собственный (и очень хороший) генератор КЭ-сеток и оболочек MeshCAST. К сожалению, у СКМ ЛП "ПолигонСофт" собственного генератора нет, поэтому применение системы будет неизбежно сопряжено с использованием дополнительного программного обеспечения и, следовательно, дополнительными тратами на его покупку. С другой стороны, модуль "Мастер-3D", в который загружается сетка для подготовки к расчету, понимает форматы многих известных инженерных программ (рис. 1), сре-

ди которых MeshCAST, который, в принципе, можно купить отдельно, и это на сегодняшний день, возможно, лучший вариант.

К слову сказать, производители "ПолигонСофт" уже тестируют собственный генератор КЭ-сеток – и очень может быть, что скоро все сказанное выше потеряет актуальность.

Подготовка к расчету сеточной модели в модуле "Мастер-3D" состоит в ее правильной ориентации в пространстве и определении типов и индексов объемов и границ. Индексация – это то, что отличает "ПолигонСофт" от всех остальных систем моделирования литейных процессов, поэтому стоит описать ее подробнее.

### О "цветовой дифференциации" в "ПолигонСофт"

"Когда у общества нет цветовой дифференциации штанов – то нет цели! А когда нет цели, то общество обречено на вымирание" (из кинофильма "Кин-дза-дза"). В этом смысле "ПолигонСофт" ждет долгая и счастливая жизнь, потому что с цветовой дифференциацией в этой СКМ ЛП все в порядке.

Всем сеточным телам и их границам в СКМ ЛП "ПолигонСофт" присваиваются индексы. Индексов тел, которые называются "индексами объемов", девять (от 1 до 9). По "индексу объема" телам формы присваиваются определенные свойства материала (материал отливки задается отдельно). Всего в расчете может участвовать десять различных материалов (один материал отливки и девять – формы).

С границами немного сложнее. Исторически сложилось так, что в "ПолигонСофт" граница двух тел (например, отливка-форма) задается дважды. То есть все как в жизни: у формы своя граница, у отливки – своя. Теоретически можно задать на этих границах разные ГУ, но

практически этого, наверное, никто не делает. Всего может быть назначено десять индексов границ, и они нумеруются цифрами от 0 до 9. При этом считается, что границы с индексом 0 – это границы внутри тела (или границы симметрии), от 1 до 7 – границы между отливкой и формой, а 8 и 9 – границы со средой.

Чтобы не запутаться во всех этих индексах, каждому из них присвоен определенный цвет (рис. 2).

Цвета запоминаются гораздо лучше, чем цифры, и, таким образом, индексация объемов и границ (а фактически назначение материалов и ГУ) превращается в подобие игры "раскрась свою отливку". На рис. 3 показано, как это может

выглядеть.

Какие цвета/индексы задавать объемам и границам, пользователь узнаёт (или задает) в модуле "Сплав" (рис. 4), в котором просматриваются и редактируются все данные по материалам, ГУ и задаются специальные параметры процес-



Рис. 2. "Цветовая дифференциация" индексов в СКМ ЛП "ПолигонСофт"

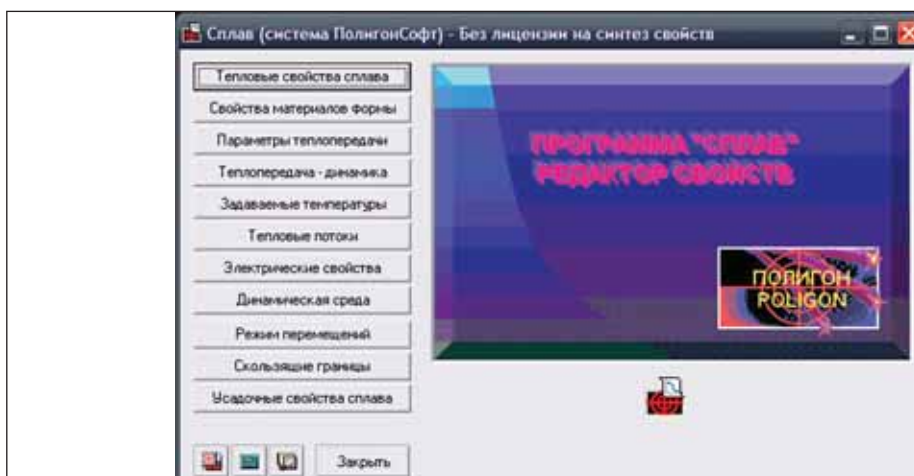


Рис. 4. Модуль "Сплав"

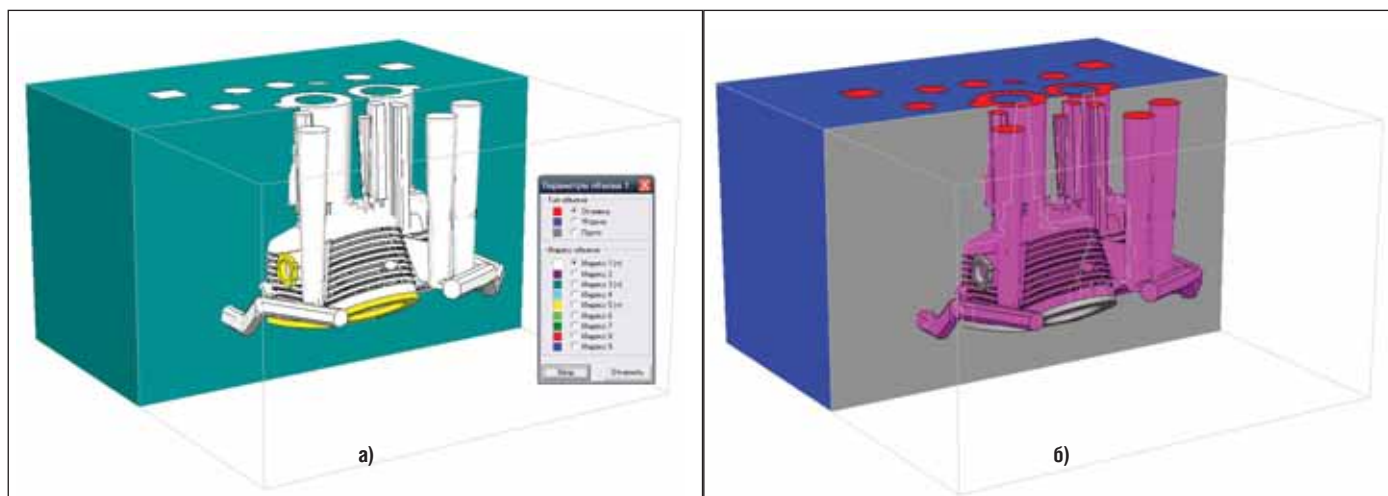


Рис. 3. Индексирование объемов (а) и границ (б) отливки "Корпус" в модуле "Мастер-3D" (ОАО "ААК "ПРОГРЕСС" им. Н.И. Сазыкина")

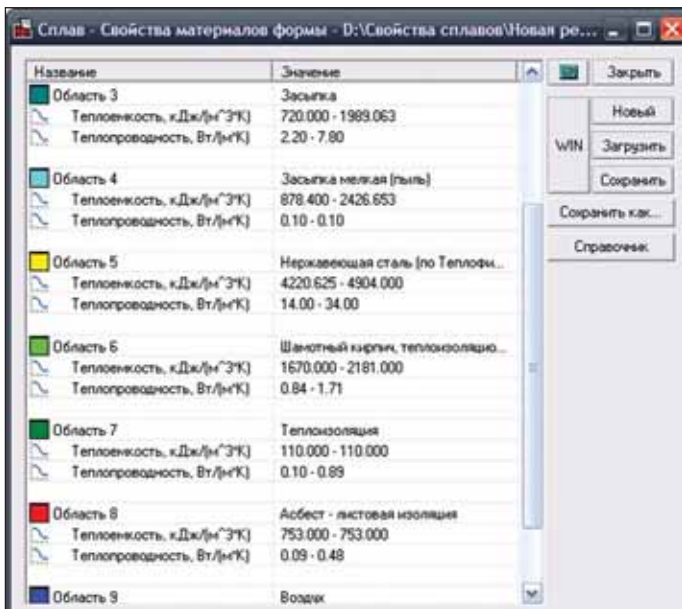


Рис. 5. Редактор свойств материалов формы в модуле "Сплав"

са: перемещение тел относительно друг друга, изменение характеристик окружающей среды, пропускание электрического тока и т.п.

Например, нажав на кнопку *Свойства материалов формы*, пользователь попадает в окно редактора (рис. 5), где может задать свойства до девяти материалов формы в соответствии с заданными в "Мастере-3D" индексами объемов. Заданный набор материалов сохраняется в файл. Таким же образом задаются условия теплоотдачи на границах и все остальные необходимые условия.

Эта несколько запутанная на первый взгляд система индексов имеет одно ог-

ромное преимущество. Она позволяет в условиях литейного производства минимизировать время на подготовку к расчету и снизить требования к квалификации персонала при сохранении качества расчета. Предположим, на предприятии используются технологии литья по выплавляемым моделям и в землю. Следовательно, применяется вполне определенный перечень материалов формы и, что главное, постоянный. Это керамика, песчано-глинистая смесь, стержни, холодильники, возможно, какие-то дополнительные материалы (например, стальной поддон, на который ставят форму при ЛВМ). Можно создать один общий или два отдельных файла (для ЛВМ и литья в землю), в которых разным областям (индексам) будут назначены соответствующие свойства материалов. Таким же образом поступаем с файлами, содержащими параметры теплопередачи на границах отливка-среда, форма-среда, отливка-форма и других (если они есть). Создаем файл, в котором задаем все необходимые параметры на разных границах

(индексах границ): коэффициент теплоотдачи, степень черноты и т.д. Если используется вакуумное ЛВМ, для него будет отдельный файл теплопередачи.

Обычно эти файлы, будучи один раз созданы, редко меняют свое содержание в условиях конкретного производства. Поэтому, задавая индексы границ и объемов в модуле "Мастер-3D", пользователь уже знает наизусть, что фиолетовый цвет — это керамика, зеленый — ПГС, а, например, желтый — стальной холодильник. "Раскрасив" КЭ-модель, пользователь фактически этим уже задает все параметры; позже при запуске расчета остается только указать, из каких файлов брать данные.

Такой подход позволяет оперативно проводить серию расчетов с разными КЭ-моделями, но в одинаковых условиях. Действительно, предположим, что расчет с первым придуманным вариантом литниковой системы (ЛПС) не удовлетворил заданному критерию качества. В других СКМ ЛП после изменения конструкции ЛПС требуется заново обозначить все границы, задать материалы, ГУ и НУ. То есть каждый раз все делается как будто впервые. В "ПолигонСофт" достаточно создать файл геометрии и задать в нем индексы объемов и границ (обычно это несколько щелчков мышкой), а все ГУ и материалы уже когда-то были заданы в модуле "Сплав".

Этот же механизм индексирования позволяет проводить предварительную настройку системы перед продажей ее на предприятие. В обзоре системы ProCAST упоминалось о "физичности" этой программы и о пользе, которую несет в себе такой подход. "ПолигонСофт" тоже требует от пользователя достаточно глубокого понимания смысла моделируемого процесса и предоставляет ему достаточный контроль над теплофизическими параметрами. Хотя справочная система модуля "Сплав" содержит всевозможные справочники по физическим величинам, значения этих величин пользователь должен выбрать и задать сам (хотя бы один раз — при настройке файлов).

С другой стороны, "ПолигонСофт" может быть предварительно настроен специалистами фирмы-поставщика ПО в соответствии с особенностями конкретного производства, что на первое время избавит технологов от головной боли, которая часто неизбежна при освоении систем высокого уровня. Разумеется, пользователь всегда может вносить изменения во все параметры системы.

### Расчет в "ПолигонСофт"

Основу СКМ ЛП "ПолигонСофт" составляет модуль "Фурье-3D" — решатель тепловой и усадочной задачи. По мере

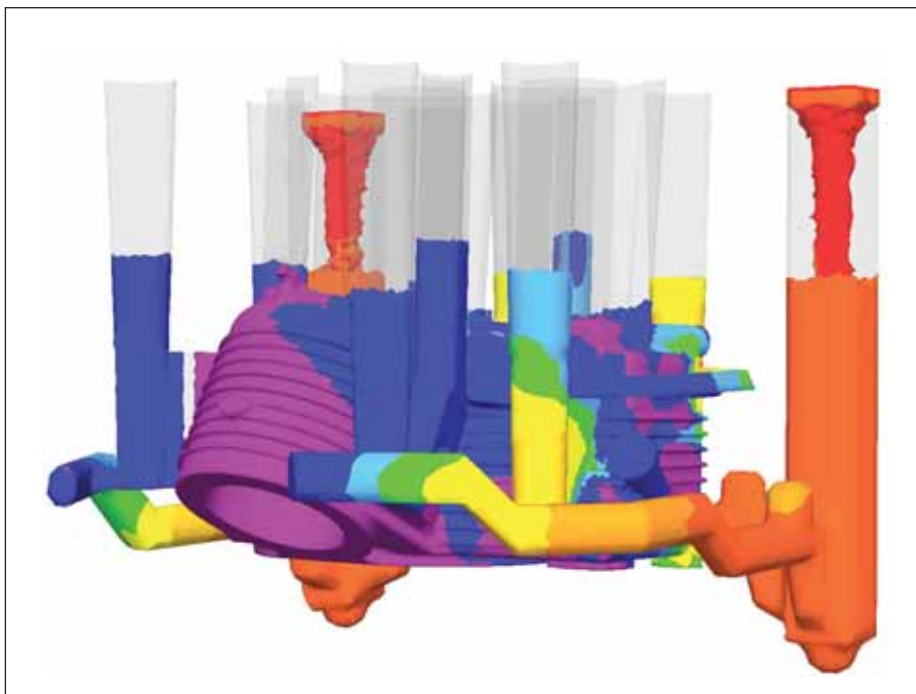


Рис. 6. Температурное поле расплава, заполняющего форму (ОАО "ААК "ПРОГРЕСС" им. Н.И. Сазыкина")

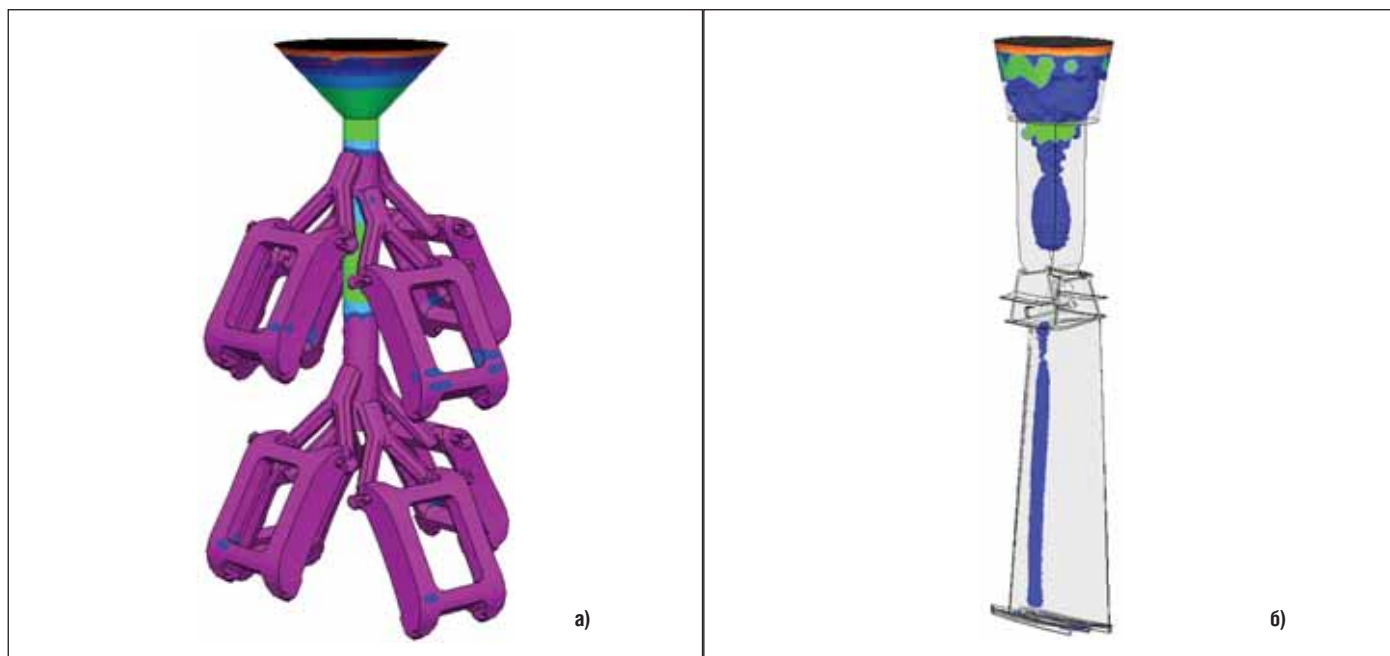


Рис. 7. Результаты расчета пористости в "Фурье-3D": а) микропористость на поверхности отливок "Корпус часов" (ЗАО "ПОЛЕТ-ЭЛИТА"); б) осевая пористость в отливке "Лопатка рабочая ГТД" (ФГУП "ММПП "Салют")

развития системы появились решатели течения и напряжений, реализованные отдельными модулями, которые "пристегиваются" к "Фурье-3D" по мере необходимости.

Хотя система "ПолигонСофт" заявлена как конечно-элементная, на самом деле МКЭ используется только основным решателем "Фурье-3D". Заполненные формы расплавом с одновременным

его остыванием решается в модуле "Эйлер-3D" (он заменил модуль FlowVision от компании ТЭСИС, использовавшийся в ранних версиях "ПолигонСофт") методом конечных разностей (МКР). Расчет напряженно-деформированного состояния отливки в процессе охлаждения проводится в модуле "Салют-D" (принадлежит ФГУП "ММПП "Салют") методом локальных функционалов

(МЛФ), который можно назвать разновидностью МКЭ.

В результате расчета заполнения формы расплавом пользователь получает информацию о характере заполнения, скоростях и температурном поле на момент окончания (рис. 6). Причем получение температурных полей отливки и формы можно назвать главной целью расчета в модуле "Эйлер-3D", поскольку

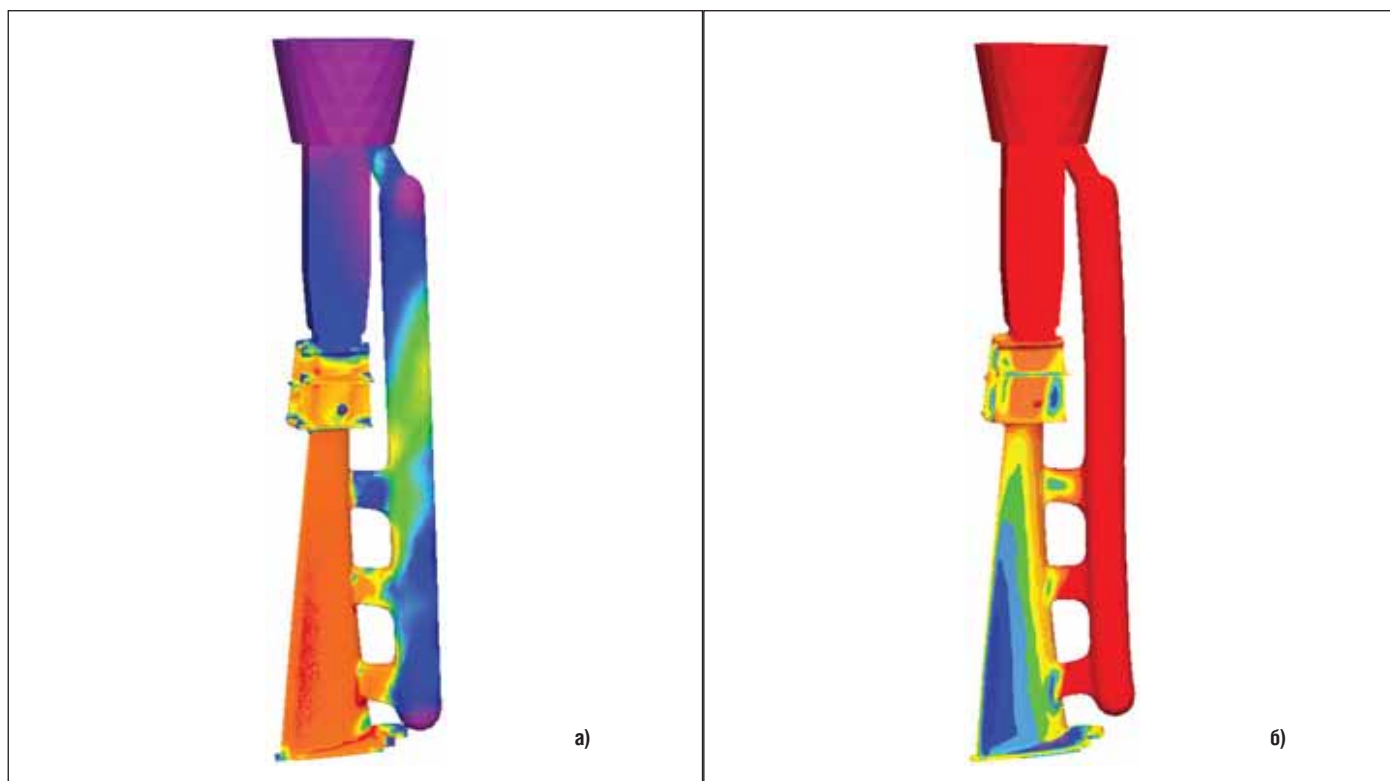


Рис. 8. Результаты расчета НДС в "Салют-D" отливки "Лопатка рабочая ГТД" (ФГУП "ММПП "Салют"): а) поле напряжений на 500-й секунде остывания; б) коробление отливки на том же шаге в масштабе 5:1

они используются как начальные условия в основном решателе "Фурье-3D", который рассчитывает возникновение усадочных дефектов (главная цель всего расчета). Поля скоростей в дальнейших расчетах не используются, так как "Фурье-3D" не учитывает перемешивания расплава.

Расчет в модуле "Фурье-3D" остается центральным моментом работы в системе "ПолигонСофт". В нем рассчитывается остывание отливки и всех элементов формы до момента, который указывает пользователь, обычно это температура солидус. "Фурье-3D" продолжает начатый в модуле "Эйлер-3D" температурный расчет и прогнозирует образование усадочных раковин, макро- и микропористости (рис. 7).

Не так давно в составе системы появился модуль расчета напряженно-деформированного состояния (НДС) отливки "Салют-D", созданный по заказу ФГУП "ММП "Салют". Модуль позволяет рассчитывать напряжения, деформации (коробление) и прогнозировать образование горячих и холодных трещин в отливке с учетом ее взаимодействия с формой (рис. 8). Отливка задается как термоупругопластическое тело, форма может быть задана абсолютно жесткой (металлический кокиль), линейно-упругой или вовсе не принимать участия в расчете (иногда подходит для керамических форм).

### Постпроцессоры "ПолигонСофт"

В СКМ ЛП "ПолигонСофт" всего много. Как и в случае с модулями подго-

товки данных (4 модуля) и процессорами (3 модуля), постпроцессоры "ПолигонСофт" тоже представлены целым набором модулей:

- "Мираж-3D" — отображение результатов расчета;
- "Мираж-Л" — отображение результатов расчета в виде кривых;
- "Критерий" — обработка рассчитанных полей по заданным критериям;
- "Слайд" — подготовка и показ слайдов с результатами расчета в системе.

Модуль "Мираж-3D" — основной постпроцессор, отображающий результаты расчета на трехмерной КЭ-модели в виде полей, векторов, изолиний и т.д. Показанные в этой статье изображения разных расчетных полей (рис. 6, 7, 8) получены из этого модуля. Его функционал не уступает возможностям постпроцессора ProCAST, а интерфейс существенно лучше.

"Мираж-Л" отображает развитие процесса во времени в заданных точках. Модуль позволяет настраивать вид кривых и параметры осей (рис. 9). По сути этот модуль является аналогом функции "X-Y Plots" в системе ProCAST и позволяет обнаружить причины многих дефектов, которые не рассчитываются напрямую в системе (например, поверхностная рыхлота, связанная с перегревом формы).

Еще один постпроцессорный модуль, "Критерий", заслуживает особого внимания. Это инструмент для обработки рассчитанных полей (чаще всего тепловых) с целью получения дополнительной информации о качестве отливки или ее свойствах. Что именно надо

сделать с полем — решает пользователь, задавая математическую функцию. Например, можно задать критерий Ниямы [2], чтобы получить дополнительные данные для прогноза образования возможных усадочных дефектов. Кроме того модуль может быть использован для коррекции свойств материала отливки, в частности, некоторых параметров усадочных свойств [3]. Для создания сложных критериев в модуль встроен специальный калькулятор, содержащий большое количество готовых функций, таких как градиент поля по осям, время затвердевания, время достижения заданной величины, скорость изменения величины и многие другие.

### Заключение

Оценивая систему "ПолигонСофт" в целом, можно сказать, что это хороший инструмент для разработки и оптимизации ЛП. Он достаточно гибок и честен при задании ГУ, что бывает принципиально при моделировании некоторых литейных процессов. Сильная сторона "ПолигонСофт" перед западными системами — качественная модель усадочной пористости.

Заметны многие общие черты "ПолигонСофт" и ProCAST, но, хотя функционал последней системы весьма внушительен, некоторые идеи наших производителей, такие как система индексации, модуль "Критерий" и другие, не попавшие в этот обзор, явно опережают европейского лидера.

В следующей статье будет рассмотрена СКМ ЛП, создатели которой "повернулись лицом" к технологу и сделали моделирование более простым.

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

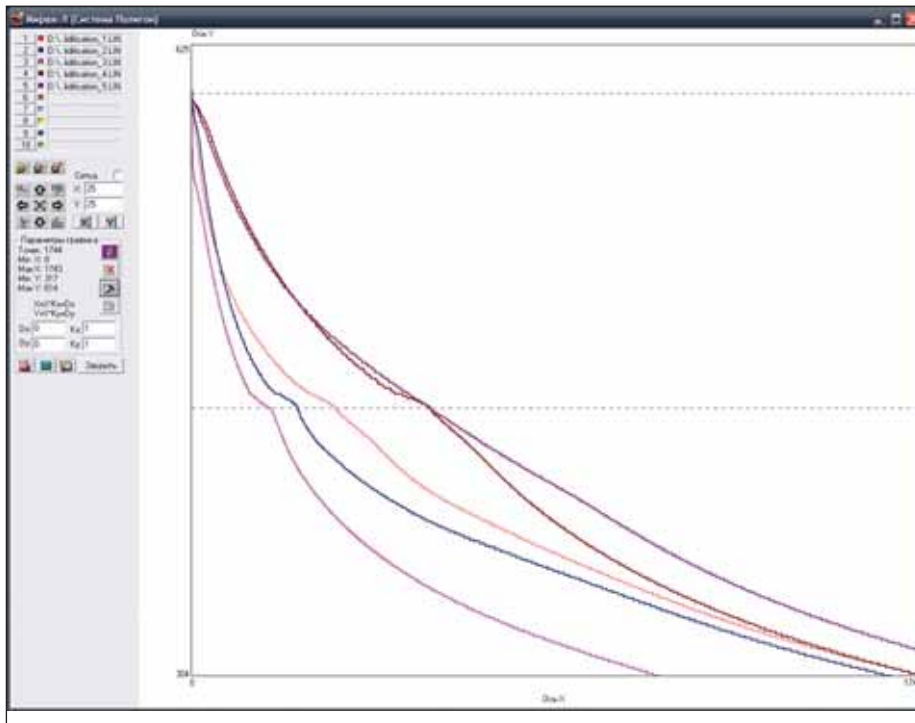


Рис. 9. Изменение температуры во времени в заданных точках модели

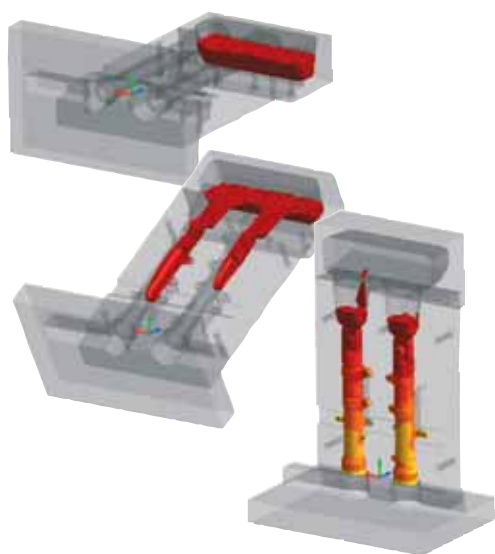
### Литература

1. А.В. Монастырский. Моделирование литейных процессов. Эпизод 1-й. Работаем в ProCAST. — CADmaster, 2009, №1, с. 10-16.
2. Niyama E., Uchida T., Morikawa M., Saito S.: Am. Foundrymen's Soc. Int. Cast Met. J., 1982, vol. 7(3), pp. 52-63.
3. В.П. Монастырский, А.В. Монастырский, Е.М. Левитан. Разработка технологии литья крупногабаритных турбинных лопаток с применением систем "Полигон" и ProCAST. — Литейное производство, 2007, № 9, с. 29-34.

# 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

**CS**soft  
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