

Сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов - 2007

В 2004 г. автором данной статьи был опубликован сравнительный обзор наиболее известных систем компьютерного моделирования литейных процессов[1]. Как показал опыт, эта информация оказалась весьма востребована как специалистами и руководителями на заводах, так и сотрудниками научных и учебных организаций. Следует отметить, что в основном публикация 2004 года не потеряла актуальность и сейчас. Однако естественно, что за прошедшие три года в системах моделирования литейных процессов произошли изменения. Поскольку повышенный спрос на информацию изложенную в [1] сохранился и сейчас, было решено опубликовать обзор с дополнениями и изменениями соответствующими 2007 году. Вообще говоря, судя по большому количеству поступающих запросов по данной тематике, вероятно следует повторять подобные публикации регулярно.

В Европе, Англии и США в настоящее время наиболее распространены две литейные моделирующие системы: **ProCast** (разработчики в США, Швейцарии и Франции) и **MagmaSoft** (разработчики в Германии). По данным производителей на каждую из этих систем за период около 10-15 лет было приобретено не менее чем 400-500 лицензий по всему миру. (В рекламных данных от MagmaSoft декларируется не менее 800 пользователей, однако вероятнее всего к «пользователями» в данном случае «приплюсованы» обновления лицензий и т.п.) Кроме того, определенный сегмент рынка в Европе занимают системы WinCast (ранее называлась Simtec, разработчики в Германии, часть из них ранее участвовали в разработке MagmaSoft) и NovaFlow (ранее называлась «LBM-3D», на западе распространяется шведской фирмой NovaCast, разработчики российские и на отечественном рынке эта система имеет название LVMFlow). Более подробно характеристики ProCast и MagmaSoft будут описаны ниже, что же касается WinCast, то следует упомянуть следующее. Несмотря на то, что в WinCast имеются определенные упрощения при решении таких основных литейных задач, как тепловая (затвердевание) и усадочно-фильтрационная (образование микропористости, макропористости и раковин), тем не менее, в WinCast на достаточно высоком уровне моделируются деформационные процессы в процессе охлаждения отливки, что для ряда литейных производств может быть весьма привлекательным. Причем, в отличие например от MagmaSoft, использующей устаревшие разностные методы (т.н. метод конечных разностей), численные решения в WinCast (как и в ProCast) проводятся на базе современного и гораздо более адекватного метода конечных элементов.

В России и СНГ лидером по распространенности является «ПолигонСофт» (ранее назывался «Полигон», разработчики в России) - за период около 10-15 лет на эту систему приобретено около 90-100 лицензий, в т.ч. в Германии, Норвегии и Южной Корее. Судя по всему, в России и странах СНГ количество лицензий на Полигон до сих пор превышает все остальные литейные системы вместе взятые, включая ProCast, MagmaSoft и другие менее известные. Для примера - ProCast и MagmaSoft вместе за 10-15 лет в России и СНГ поставили не более 15-18 лицензий, причем часть из них – временные и в настоящее время не используются. В России второе место по распространенности в настоящее время занимает LVMFlow (как указывалось выше, ранее назывался «ЛВМ-3D», разработчики в России). Более подробно характеристики ПолигонСофт будут описаны ниже, относительно же LVMFlow необходимо отметить следующее. В конце 80-ых годов в России/СССР пакет «ЛВМ-3D» был наиболее известным отечественным литейным пакетом и это вполне заслужено, т.к. на тот момент это был единственный отечественный трехмерный пакет для моделирования литейных процессов. В начале 90-ых годов это лидерство было по объективным причинам утеряно. В отличие от системы «ПолигонСофт», которая использует адекватные и современные конечно-элементные алгоритмы (как например ProCast), система LVMFlow использует относительно устаревший и неточный метод конечных разностей (как например MagmaSoft). Однако, несмотря на все недостатки конечных разностей, LVMFlow может вполне адекватно применяться для моделирования литья в малотеплопроводные разовые формы. По таким показателям, как скорость расчетов, удобство интерфейса и некоторым другим важным параметрам, LVMFlow вполне может составлять конкуренцию разностным западным пакетам, хотя конечно конечно-элементные пакеты типа ProCast или «ПолигонСофт» объективно имеют более широкий круг применимости по сложности геометрии отливок и способам литья.

Перед тем, как дать более подробную характеристику системам «ПолигонСофт», ProCast и MagmaSoft, имеет смысл дать некоторые пояснения относительно упомянутых выше методов расчета – методе **конечных разностей** и методе **конечных элементов**. Эти методы серьезно различаются по достоверности решения. Как уже упоминалось выше, ПолигонСофт и ProCast используют метод конечных элементов, а MagmaSoft метод конечных разностей. Метод конечных разностей разработан достаточно давно и, несмотря на определенные недостатки при решении граничных задач теории поля, первые успехи численного моделирования с применением вычислительной техники связаны именно с ним. Метод конечных элементов более молодой, более математизированный и содержит гораздо меньше упрощений. Он начал разрабатываться американскими исследователями для решения деформационных задач в космической области, впервые опубликован ими в 1950 году и затем получил широкое распространение для всех задач теории поля – тепловой, электродинамической, фильтрационной, диффузионной и т.д. Для

внешнего наблюдателя эти методы отличаются по представлению геометрии – при разностном методе геометрия представлена «кирпичиками» (параллелепипедами), а при элементном методе используется достаточно гладкая сетка конечных элементов (чаще всего тетраэдров) произвольных размеров и конфигурации. Не всегда это отличие видно в явном виде, т.к. при визуализации не обязательно показывать на экране компьютера явно искаженную «кирпичную» геометрию, можно проводить визуализацию разностного решения и на гладких поверхностных сетках исходных геометрических моделей, так чтобы «кирпичики» не было видно. Однако, дело в основном не во внешнем виде моделируемой отливки, а в существенной разнице в основных постулатах этих методов и, как следствие, в разной достоверности решения. Метод конечных элементов, помимо более точного описания геометрии, в силу принципиально более сложного и адекватного математического аппарата, более точно описывает и процессы происходящие в рассматриваемой геометрической модели. При моделировании литейных процессов разностные и элементные методы могут иметь существенные отличия в адекватности решения. Следует отметить, что в настоящее время практически все универсальные (не литейные) моделирующие пакеты, такие как ANSYS, Nastran, Patran и т.д. давно отказались от устаревшего метода конечных разностей и используют только метод конечных элементов. По этому же пути пошли наиболее продвинутые литейные пакеты, такие как ProCast, WinCast, «ПолигонСофт». Дело в том, что разностные методы плохо подходят для сложных геометрий в задачах с существенным влиянием граничных потоков. Для условий литья это означает, что разностные методы могут более-менее адекватно использоваться при литье в малотеплопроводные разовые формы, когда нет скачка моделируемой функции (например температуры) на границе «отливка-форма». При литье в кокиль, ЛПД, ЛНД и т.п. (особенно при сложных фасонных геометриях) разностные методы всегда будут давать принципиальную систематическую погрешность, которая отсутствует в конечно-элементных методах. Например, для литья тела типа «цилиндр» в холодный кокиль по времени затвердевания разностное решение даст ошибку примерно в 20-30% (в зависимости от начальных температур, свойств сплава и теплопроводности материала кокиля). Это легко устанавливаемый факт, известный вероятно любому непредвзятому специалисту по численным методам – достаточно проверить соотношение объема и теплоотводящей поверхности при разностном представлении геометрии. Например площадь поверхности шара в разностном представлении не в зависимости от густоты разностной сетки всегда будет равна площади поверхности куба того же габарита, т.к. все поверхности «разностного шара» будут представлены ортогональными «квадратиками». Помимо этого, элементные методы менее ресурсоемкие и более скоростные, чем разностные. Например, для геометрий типа «куб» оба метода дадут одинаковое решение, но метод конечных элементов при требовании равной адекватности с разностным методом, всегда потребует примерно на порядок меньше вычислительных ресурсов и время

расчета будет в несколько раз меньше. Фактически применение разностных методов в моделировании литейных процессов сейчас оправдано только для решения гидродинамических задач при заливке, т.к. величины и направления векторов скоростей меняются с большей дискретностью, чем это можно описать конечно-элементной сеткой без потери преимуществ конечно-элементного метода по скорости расчета. В наиболее «сильных» литейных пакетах, таких как «ПолигонСофт» и ProCast, все основные литейные задачи решаются на базе метода конечных элементов, а специально для гидродинамических задач используется либо собственно метод конечных разностей, либо т.н. «промежуточные» методы. Часто при этом, визуализация «условно-разностного» решения в таких «базово-элементных» пакетах проводится на конечно-элементной сетке, что быстрее и удобнее. Однако, как уже говорилось, такие «разностные отступления» оправданы только в гидродинамических ветвях расчета. То, что в части литейных пакетов до сих пор используются (и пропагандируется) разностный метод как основной метод расчета, свидетельствует о достаточно обидном факте - наблюдается очевидное отставание среднего уровня пользователя литейного пакета от среднего уровня «прочниста», «деформатора» и т.п. Причем как у нас, так и на западе. Вряд ли специалиста по деформационным процессам (западного или отечественного) сейчас можно было бы убедить купить разностный пакет, каким бы солидным имиджевым капиталом этот пакет ни обладал. Более подробно о соотношении результатов разностных и элементных решений при моделировании тепловых задач в литейной постановке см. [2].

MagmaSoft - немецкий моделирующий пакет, базирующийся на методе конечных разностей, один из первых коммерческих литейных пакетов, фактически впервые продемонстрировавший, что возможно всерьез моделировать сложные литейные процессы на достаточно высоком уровне. В этом смысле система MagmaSoft имеет заслуженную и прочную положительную репутацию. Численными методами в MagmaSoft решаются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы. Также численно решается задача прогноза макропористости и раковин, хотя используемые при этом модели носят явно упрощенный характер не отражающий современные представления о сложном и динамическом характере структурированности сплавов в интервале затвердевания. Прогноз микропористости, структурных, механических и других характеристик отливки проводится на уровне критериального анализа. (Критериальный анализ предполагает обработку базовых полей рассчитанных численными методами с помощью относительно простых критериев.) В целом, MagmaSoft более распространена в Европе, чем например в США, однако для наиболее ответственных литейных технологий (типа литья лопаток для турбин самолетов и др. отливок ответственного назначения) и в США, и Европе применяют в основном ProCast. Это связано с отставанием математических алгоритмов и физических моделей, применяемых в MagmaSoft от

аналогичных алгоритмов и моделей в ProCast. К наиболее сильным сторонам MagmaSoft имеет смысл отнести достаточно большое количество "вшитых" критериев, которые на уровне критериального анализа позволяют прогнозировать различные полезные свойства - структуру, механические характеристики и т.д. Кроме того, разработчики пакета большое внимание уделяют экспериментальной работе, определению различных «настроечных» коэффициентов для различных способов литья, сплавов и материалов, которые в скрытом виде интегрируют в систему, что позволяет в некоторой мере компенсировать упрощенность моделей и алгоритмов. Для типовых случаев это облегчает задачи моделирования, хотя затрудняет решение для проблемных отливок.

MagmaSoft имеет собственный хорошо развитый генератор разностных сеток. Как и во всех разностных пакетах, в MagmaSoft генерация расчетной разностной геометрической модели для пользователя не представляет особых затруднений, если исходная геометрия относительно несложна или пользователь не озабочен точным соблюдением соотношений толщин различных «стенок» и достаточным количеством разностных элементов по толщине «стенок». В общем случае ошибка по толщине «стенки» равна локальному шагу сетки. Для сложных геометрий достаточное количество разностных элементов в «стенке» чаще всего просто недостижимо в силу ограниченности вычислительных ресурсов. Как показано в [2], количество разностных элементов для адекватного описания температурного распределения должно быть не менее десятка по любой толщине. Для сложной фасонной геометрии, особенно при наличии литейных уклонов и напусков (обычно около 3 градусов) учет всех важных геометрических соотношений в MagmaSoft становится практически невозможным, однако это не недостаток реализации, а просто особенность разностного описания геометрии.

К недостаткам этой системы относятся «закрытый» характер используемых критериев и невозможность их редактировать, настраивать и дополнять, что существенно снижает возможность их адекватного применения. Дело в том, что в отличие от численных решений, критериальный анализ хорошо работает только в достаточно узких пределах для которых выведен данный критерий и подобранные эмпирические коэффициенты в нем. Для использования некоторого критерия в других производственных условиях необходима его адаптация, которая в MagmaSoft чаще всего практически невозможна, как и невозможно определить что данный критерий учитывает и от каких технологических параметров зависит. Примерно то же самое относится и к задаваемым начальным условиям – они во многом закрыты от пользователя и их «подстройка» происходит на уровне назначения способа литья и т.п. наиболее общих характеристик, которые не отражают реальный возможный разброс параметров в пределах одного и того же способа литья. Такой подход выгоден для «хорошо настроенных» устойчивых технологий при жестком контроле за всеми параметрами производства. Однако, поскольку

достаточно сложно определить на какие именно параметры производства ориентировались разработчики, соответственно и результаты расчетов часто носят весьма условный характер. К самым большим недостаткам MagmaSoft следует отнести разностный метод расчета, который плохо приспособлен для литья в кокиль, очень плохо подходит для литья тонкостенных отливок типа лопаток, весьма проблематичен для сложных фасонных отливок типа блоки цилиндров и т.п., хотя разумеется примеры подобных расчетов дилеры и производители MagmaSoft с удовольствием демонстрируют. Правда, при этом никогда не приводят сравнения результатов базового теплового расчета с решениями в конечно-элементных пакетах даже для относительно простых конфигураций.

В целом MagmaSoft можно отнести к системе «среднего» класса, ориентированную на решение относительно типовых задач при ограниченном наборе адекватно учитываемых факторов. Если отвлечься от цены, то можно было бы рекомендовать MagmaSoft к применению в широком диапазоне литейных производств в качестве надежного, проверенного пакета «среднего» уровня, естественно, исключая усложненные специальные способы литья, «проблемные» технологии и геометрии повышенной сложности. Однако в настоящее время MagmaSoft является едва ли не самым дорогим литейным пакетом. С учетом соотношения «цена/возможности» в качестве литейного пакета «среднего» уровня более выигрышно выглядит например LVMFlow. Высокая цена и высокий имиджевый капитал системы MagmaSoft часто вводят в заблуждение и создают впечатление, что MagmaSoft - это т.н. «тяжелый» пакет, ориентированный на решение задач любой сложности. Более того, некоторые дилеры, не обладая достаточными литейными знаниями, опытом моделирования и необходимыми представлениями об алгоритмах и моделях пакета, который продают, часто активно и безапелляционно позиционируют MagmaSoft как «тяжелый» пакет. В результате этого, на некоторых заводах складывается негативное отношение к этому пакету, т.к. он не оправдывает завышенных ожиданий. Вряд ли в этом стоит винить саму систему, просто имеет смысл более взвешенно подходить к процессу внедрения, аналогичная ситуация может возникнуть и с действительно «тяжелым» пакетом, если недостаточна квалификация пользователей. При всем этом, для тех производств, где реальную технологическую поддержку смогут обеспечить непосредственно сами разработчики MagmaSoft, которые научат правильно интерпретировать результаты расчетов с учетом погрешностей, смогут обеспечить коррекцию «вшитых» критериев и параметров моделей, эту систему можно будет использовать и для достаточно проблемных задач. При таких условиях MagmaSoft можно будет использовать фактически в качестве базового «тяжелого» пакета даже в тех случаях, при которых разностные методы сами по себе уступают элементным. В этом случае конечно понадобятся пользователи с достаточно высокой профессиональной подготовкой, хорошо знакомые как с физикой литейных процессов, так и с технологическими особенностями своего литейного производства.

Представленный выше анализ возможностей по использованию пакета MagmaSoft отражает не только материалы предоставляемые разработчиками и дилерами этого пакета, но и многолетний опыт моделирования на различных литейных пакетах при разработке реальных технологий, а также их поддержки, внедрения и проведения обучения, в т.ч. и проведение обучения работе с MagmaSoft.

ProCast – конечно-элементный пакет изначально разработанный в США (в настоящее время часть разработчиков в Швейцарии и Франции, формально ProCast сейчас принадлежит французской фирме), по объективным показателям более «мощный» чем MagmaSoft, т.к. помимо собственно преимуществ элементного подхода, в ProCast используются более сложные и физически-универсальные модели, что существенно повышает адекватность расчетов. В ProCast численными методами моделируются тепловые, гидродинамические и деформационные процессы, а также процессы структурообразования (кристаллизационные процессы). Критериальный анализ в ProCast представлен достаточно слабо, что, судя по всему, связано с принципиальной позицией разработчиков. Вероятно в тех случаях, когда разработчики ProCast считают ту или иную модель недостаточно проработанной на физическом уровне для того, чтобы ее можно было использовать в численных расчетах, они просто отказываются от ее реализации, считая, что средства критериального анализа не обеспечивают должной адекватности. Возможность проводить в ProCast численные расчеты кристаллизационных процессов весьма привлекательна для тех производств, где существенное значение имеют параметры структуры отливки. Это в первую очередь лопаточные производства, где существуют жесткие требования по этим параметрам. Для сравнения – и MagmaSoft, и «ПолигонСофт» для прогноза структурных параметров используют не численный расчет, а критериальный анализ, который в общем случае менее достоверен. Хотя в защиту критериального подхода можно отметить, что при прогнозе структуры с помощью критериального анализа не требуется такой серьезной подготовки пользователя в области теории кристаллизации, как при полномасштабном моделировании структурообразования численными методами. Для проведения численных расчетов структуры в ProCast необходимо правильно выбрать кристаллизационную модель и правильно назначить ее параметры. Не всякий, даже хорошо разбирающийся в физике основных литейных процессов специалист, способен на это. Однако эта задача не всем и нужна в такой «сильной» постановке, так что в данном случае повышенные требования к квалификации пользователя вряд ли можно отнести к недостаткам. К главным достоинствам этого пакета следует отнести возможности учета сложных тепловых граничных условий, учет возможности перемещения объектов (например для направленного затвердевания лопаток), возможность учета сложной реологии при деформационных расчетах и, как уже указывалось, возможность численного расчета структуры в отливках. Следует отметить,

что «сложная реология» при деформационных расчетах в ProCast включает в себя и возможность моделирования таких сложных процессов, как непластические течения.

ProCast имеет собственный генератор конечно-элементных сеток, которым можно с успехом пользоваться для геометрий средней сложности. Для сложных же геометрических моделей обычно приходится пользоваться специализированными внешними генераторами, которые в настоящее время имеются на рынке. Дело в том, что генерация конечно-элементной сетки – это задача алгоритмически гораздо более сложная, чем например разностной. В настоящее время наиболее успешно этот вопрос решается в специализированных системах, предназначенных для получения конечно-элементных моделей на базе импортируемых исходных геометрий в форматах максимально большого количества CAD-систем.

К недостаткам этого пакета можно отнести все еще недостаточно серьезный уровень решения усадочной задачи (расчет раковин, микропористости, макропористости). Однако, следует отметить, что за последние 2-3 года в ProCast весьма существенно улучшились модели формирования усадочных дефектов. Фактически были разработаны и реализованы новые модели, серьезно отличающиеся от тех весьма «слабых» алгоритмов, которые применялись в ProCast до этого. Но, все-таки, одна из основных задач технолога-литейщика – избежать усадочных и газо-усадочных дефектов в ProCast пока не имеет такой же серьезной поддержки, как решение задачи формирования структуры, что довольно обидно для пакета такого уровня.

ProCast – это типично «тяжелая» система, гораздо более универсальная, чем, например MagmaSoft и предназначенная для решения сложных задач при разработке литейной технологии с адекватным учетом максимально большого количества действующих факторов. Ее конечно несколько портит отсутствие возможности моделирования на должном уровне образования макропористости, раковин и микропористости, а также явное пренебрежение к возможностям критериального анализа, но зато те задачи, которые в пакете декларируются как «численный расчет» решаются в максимально возможно «сильной» постановке с возможностью управления всеми параметрами, определяющими ход процесса. ProCast можно рекомендовать в качестве базовой «тяжелой» системы для отливок и технологий любой сложности, исключая те случаи, где требуется моделирование образования усадочных дефектов с учетом реального динамического характера структурированности двухфазной зоны (расчет макропористости и раковин) и падения давления за счет фильтрационного течения в двухфазной зоне при усадке (расчет микропористости). Вероятно особенно эффективен этот пакет будет в тех случаях, когда технологом требуется решение деформационных задач со сложной реологией и задач формирования структуры в отливке, хотя обе эти задачи потребуют пользователей с достаточно серьезной базовой подготовкой.

Приведенный выше анализ возможностей ProCast базируется на опыте расчетов на этой системе литейных технологий по заказам заводов, а также обучение работе с этой системой специалистов российских заводов. Параллельно с «Полигоном», система ProCast на территории России в течении ряда лет поддерживалась разработчиками «ПолигонСофт» в качестве «системы для рабочих станций». В настоящее время ProCast разработчиками «ПолигонСофт» не поддерживается.

ПолигонСофт - российский конечно-элементный пакет, начавший создаваться в конце 80-ых годов в ЦНИИ Материалов по заказу Министерства оборонной промышленности для заводов министерства. Сейчас в основном разрабатывается фирмами «Фоундрикад» и «Полигон». В настоящее время наиболее распространен на предприятиях Оборонного комплекса, предприятиях АвтоПром, заводах Аэрокосмического комплекса и крупных машиностроительных заводах имеющих литейные производства. В последние 5-8 лет стал активно применяться в технических университетах. Практически каждый год выпускается очередная версия «ПолигонСофт».

В системе «ПолигонСофт» численными методами решаются задачи моделирования гидродинамических, тепловых и усадочно-фильтрационных процессов. Кроме того, численно решается задача распределения электрических потенциалов в затвердевающей отливке в условиях приложения электрического тока. Методами критериального анализа решаются задачи прогноза прочности, твердости, структурных параметров, размыва форм и т.п. К достоинствам пакета, помимо применения конечных элементов, следует отнести сложные и адекватные физические модели тепловых процессов и возможность учета сложных граничных условий [3], учет возможности перемещения объектов (для направленного затвердевания лопаток), а также возможность полномасштабного решения задачи образования усадочных дефектов [4]. Возможность учета сложных граничных условий для отливок с усложненной геометрией при применении специальных способов литья позволяет применять Полигон в таких сложных литейных производствах, как литье лопаток, в т.ч. методами направленного затвердевания. В частности, для моделирования литья лопаток в условиях приложения электрических потенциалов Полигон много лет успешно используется в АО «Сатурн» (г. Рыбинск) [5]. Возможность учитывать сложные процессы при направленном затвердевании позволяет задействовать Полигон при производстве отливок крайне ответственного назначения, например по заказу Российского Космического Агентства Полигон использовался для моделирования технологий литых деталей ракетного двигателя носителя «Протон» и носителя «Русь», производимых на ФГУП «Воронежский Механический Завод». Одна из наиболее «сильных» сторон Полигона - это адекватные и современные физические модели процессов образования усадочных дефектов – микропористости, макропористости и раковин. В Полигоне проводится совмещенный расчет образования усадочных дефектов по двум совершенно различным механизмам – «микро» и

«макро», с расчетом фильтрационного течения, расчетом полей давлений в отливке, с учетом сложного динамического характера изменения структурированности сплава в интервале затвердевания [4].

Фактически в такой сложной постановке задача формирования усадочных дефектов в численном виде не решается ни в одном другом литейном пакете, хотя задача прогноза усадочных дефектов является чуть ли не основной задачей технолога-литейщика. Такое положение объяснимо, если вспомнить под эгидой какого ведомства начинался Полигон – он сразу должен был давать адекватные решения в наиболее важных вопросах для ответственных и проблемных отливок, иначе были возможны довольно неприятные ситуации. В этом смысле показательным является опыт ФГУП «Салют» (г. Москва), производящий лопатки турбин, в т.ч. для СУ-27 и др. самолетов этой серии. Это предприятие приобрело сетевую лицензию Полигона на несколько рабочих мест и после года эксплуатации Полигона для проверки возможностей других пакетов заказало моделирование одной из просчитанных на Полигоне проблемных отливок дилерам MagmaSoft и ProCast. Ни один из этих пакетов не показал усадочных дефектов там, где их показал Полигон и там, где они действительно присутствовали. Причем выявили их местоположение именно после моделирования на Полигоне. Данный факт был объявлен в докладе представителей ФГУП «Салют» на литейном семинаре в Санкт-Петербурге весной 2004 года, проводимым фирмой «Фокад». Это далеко не единственный пример такого рода, причем для специалистов, знающих суть вопроса, в этом нет ничего удивительного. В других пакетах те процессы, которые моделирует Полигон при формировании усадочных дефектов, вообще не рассматриваются, а используются простейшие модели. Эти простейшие модели более-менее отражают реальность лишь в достаточно очевидных случаях формирования жестко изолированных тепловых узлов.

Для использования возможностей критериального анализа в пакете имеется специальный модуль, позволяющий использовать не только предлагаемые разработчиками Полигона критерии для прогноза механических свойств, размыва формы и т.д., но и формировать базу "собственных" сложных критериев с учетом химического состава, логикой перехода от одной формулы к другой и т.п. К тем критериям, которые предлагаются разработчиками, прилагаются полные описания этих критериев, в т.ч. описание методики их настройки на параметры конкретного производства. Это позволяет пользователю наиболее эффективно использовать возможности критериального анализа и, используя исходные численные решения, действительно адекватно прогнозировать различные технологические и эксплуатационные свойства отливки. Более подробно о соотношении численных и критериальных алгоритмах см. [6].

При назначении свойств сплавов, материалов, граничных условий и т.п. пользователь имеет полный доступ ко всем параметрам, может как угодно изменять и дополнять исходные базы по свойствам. К Полигону подключен обширный справочник по свойствам сплавов и материалов

форм. Кроме того, можно использовать генератор свойств сплавов по задаваемому химическому составу – для серых чугунов, сталей и алюминиевых сплавов. Одна из сильных сторон пакета – это, несомненно, эффективные и удобные постпроцессоры. Все пользователи Полигона отмечают, что постпроцессоры Полигона, визуализирующие результаты расчетов превосходят аналогичные в MagmaSoft, ProCast и др.

Геометрический препроцессор Полигона предоставляет обширные возможности по работе с конечно-элементной сеткой: редактирование сетки, выделение областей с недостаточной густотой, измельчение в указанных областях, регуляризация сетки (улучшение качества), выявление и автоматическое исправление недопустимых элементов и многое другое. Препроцессор позволяет импортировать сетки практически всех известных генераторов: FEMAP, HyperMesh, GiD, ANSYS, Nastran, Pro/Mesh (модуль ProEngineer), генератор в Unigraphics, StressLab (модуль CADDs), MeshCast (модуль ProCast) и др. Такой подход, исключающий «встроенный» генератор, связан с тем, что в настоящее время генераторы конечно-элементных сеток являются такими же универсальными системами, как например CAD-системы. Как показывает опыт, для быстрого создания качественной элементной модели сложной фасонной отливки требуется отдельная развитая система, основное назначение которой – генерация сетки на базе исходных геометрических моделей импортируемых из CAD-систем. По желанию заказчика совместно с Полигоном поставляется один из таких генераторов – FEMAP, HyperMesh или GiD, различающиеся по цене, удобству интерфейса и возможностям. Однако, достаточно часто заводы используют генераторы уже имеющихся на заводе CAD-систем типа Unigraphics и ProEngineer или систем для прочностных расчетов типа ANSYS и Nastran. Описанная выше организация работы с сетками позволяет совместно с Полигоном использовать все наиболее популярные CAD-системы: SolidWorks, Unigraphics, ProEngineer, EUCLID, CATIA, Cimatron, «Компас-3D», CADDs и др.

К недостаткам пакета следует отнести отсутствие полномасштабной деформационной задачи с учетом сложной реологии (разработчики предполагают выпустить подобный модуль в начале 2005 г.) и, пожалуй, избыточную сложность моделей при решении гидродинамических задач. Вероятно для литейных процессов можно было использовать менее сложные и универсальные модели за счет чего уменьшить ресурсоемкость и увеличить скорость решения гидродинамической задачи. Кроме того, несмотря на то, что как указывалось выше, Полигон решает усадочную задачу едва ли не лучше, чем все остальные литейные пакеты, даже этого далеко не всегда достаточно. Помимо тех двух основных механизмов, которые моделирует Полигон («микро» и «макро») при образовании усадочных дефектов, в реальности действуют еще и т.н. «промежуточные» механизмы, которые в модели Полигона пока не входят. Помимо этого, в серых чугунах существует еще т.н. предусадочное расширение, иногда полностью

компенсирующее усадку. Это предсудачное расширение при моделировании в Полигоне для серых чугунов задается и учитывается, но модель этого учета относительно несложная и не учитывает возможность полной компенсации усадки, т.к. не отражает всего многообразия возможностей протекания процесса предсудачного расширения. Для сложных геометрий это несущественно, в них полной компенсации не происходит никогда, но на простых геометриях это может приводить к завышенным прогнозам по макропористости. За пределами СНГ пакет практически не распространен (исключая продажи на лопаточные предприятия Южной Кореи и «университетские» лицензии в Германии) и дилеров за пределами СНГ не имеет.

На настоящий момент в СНГ Полигон безусловный лидер по количеству приобретенных заводами лицензий. Среди пользователей Полигона много крупных и известных в России заводов: ОАО «АвтоВАЗ», АО «УАЗ», АО «Сатурн», ФГУП «Салют», АО «Красный двигатель», ФГУП «ВМЗ», АО «Звезда», АО «Ижорские заводы», АО «Завод турбинных лопаток», АО «БумМАШ» и многие другие заводы. В учебных целях «Полигон» используется в Тульском ГТУ, Комсомольско-Амурском ГТУ, Самарском ГТУ, Минской ПА, Тольятинском ПИ, Петербургском ИМ, Петербургском СЗПИ и др.

Причем, часть предприятий, приобретающих лицензии на Полигон, делало это в целях замены ранее приобретенного другого пакета. Показателен в этом смысле опыт ОАО «АвтоВАЗ». Ранее этот завод приобрел MagmaSoft. Однако через год эксплуатации MagmaSoft, было принято решение приобрести более эффективный и адекватный пакет в качестве базового. В целях обеспечить обоснованный выбор другого литейного пакета, завод взял на опытную эксплуатацию систему ProCast и одновременно заказал моделирование проблемной отливки «Блок цилиндров а/м ВАЗ» в системе Полигон. По результатам моделирования завод взял на опытную эксплуатацию еще и систему Полигон. По результатам опытной эксплуатации пакетов ProCast и Полигон, было принято решение в качестве базовой литейной системы использовать Полигон, и завод приобрел три полные лицензии Полигона. На литейном семинаре в Санкт-Петербурге в 2004 году проводимым фирмой «Фокад» представители ОАО «АвтоВАЗ» опубликовали доклад, в котором было заявлено, что с помощью моделирования на системе Полигон по некоторым технологиям был достигнут экономический эффект, перекрывающий стоимость Полигона.

По классу Полигон безусловно является «тяжелой» системой, предназначенной для решения задач проектирования литейной технологии для любых способов литья при неограниченной сложности геометрии отливки с учетом максимального количества действующих факторов. Как и всякая «тяжелая» система Полигон хорошо подходит для решения задач по «проблемным» нетиповым технологиям. Однако, это не означает, что на Полигоне неудобно моделировать несложные или типовые отливки. Например, на ФГУП «ВМЗ» (г. Воткинск) по утверждению представителей завода через Полигон проходит около 70% всех проектируемых

технологий. Лицензии на систему Полигон могут быть трех типов: Light (легкая), Professional (профессиональная) и Special (специальная). Они различаются по цене и максимальному количеству элементов в моделируемой геометрии, однако все используют одинаково адекватные физические модели и одинаково эффективные математические алгоритмы. Все три вида лицензий могут быть как в обычном, так и в сетевом варианте.

Литература

1. Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей?- М.: Литейное производство.- 2002, No 5, с.22-28.
2. Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей?- М.: Литейное производство.- 2002, No 5, с.22-28.
3. Тихомиров М.Д., Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача.- М: Литейное производство.- 1998, No 4, с.30-34.
4. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача -М.: Приложение к журналу Литейное производство.- 2001, No 12, с.8-14.
5. Калюкин Ю.Н., Мальцева Ю.Ю., Тихомиров М.Д., Сабиров Д.Х. Высокоэффективная технология литья крупногабаритных лопаток ГТД.- М.: Литейное производство.- 2001, No 11, с.7-9.
6. Тихомиров М.Д., Основы моделирования литейных процессов. Важные особенности систем моделирования.- М: Литейное производство.- 2004, No 5, с.24-30.