



*The casting process analysis technique with the help of ProCAST package applied at the Minsk Tractor Plant is described.*

*Е. Г. ШВАРЦ, ПО "МТЗ", В. Л. АКУЛИЧ, ИП "МИКРОЭКСПРЕСС"*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЛИТЬЯ. ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ОГМЕТ ПО "МТЗ"**

С каждым годом все больше и больше в современном производстве начинают использоваться новые компьютерные технологии. Они призваны повысить качество выпускаемой продукции, сократить сроки производства, сделать работу людей максимально эффективной. Не обошла эта тенденция и Минский тракторный завод и его литейное производство. Вот уже год в ОГМет работают система трехмерного проектирования UG и система моделирования литья ProCAST. Эти программные продукты помогают сократить затраты на подготовку производства и повысить качество выпускаемых отливок. В настоящей статье речь пойдет о том, как с помощью моделирования процессов литья можно бороться с браком, какие при этом возникают трудности. Сегодня, после года эксплуатации, мы можем говорить о том экономическом эффекте, который позволяет получить использование средств имитационного моделирования процессов литья.

За год эксплуатации ProCAST было промоделировано 11 отливок, получен опыт работы с подобными системами, выявлены задачи, которые наиболее эффективно можно решать с помощью пакетов моделирования процессов литья.

Как и при внедрении других современных информационных систем, перед нами встал вопрос кадров. Дело в том, что для проведения успешного моделирования необходимо, во-первых, правильно ввести имеющиеся данные в компьютер (подготовка компьютерной модели отливки, разбиение ее на сетку конечных элементов, назначение граничных условий); во-вторых, оценить адекватность полученных результатов моделирования, проанализировать их и предложить возможные варианты решения проблемы. При этом следует учитывать различные аспекты (возможности технологического оборудования, сложность внедрения данного решения и т.д.).

Понятно, что первое характерно для молодых, быстрых, но неопытных сотрудников. Большим опытом обладают, как правило, пожилые специалисты, которым тяжело переключиться на новые скорости и технологии. Наилучший результат дос-

тигается при совместной работе опытного технолога и человека, владеющего компьютером. Человек, имеющий навыки работы с компьютером, уже после 2 месячного обучения может хорошо справляться с первой задачей.

Процесс моделирования литья можно разделить на несколько этапов:

- 1) сбор данных о существующем технологическом процессе;
- 2) построение трехмерных моделей отливки, литниковой системы и формы;
- 3) разбиение трехмерных моделей на сетку конечных элементов;
- 4) проведение нескольких расчетов для того, чтобы найти условия, при которых распределение дефектов в отливке, рассчитанное на компьютере, наиболее точно совпадает с распределением дефектов, наблюдаемым в реальных отливках;
- 5) анализ полученных результатов и поиск решения, позволяющего снизить процент брака;
- 6) проведение расчетов для проверки принятых решений.

Наиболее трудоемкими и ответственными здесь являются первые два этапа. На первом этапе нужно собрать наиболее полные данные о реальном процессе производства отливок. От того, насколько хорошо это будет сделано, зависит количество расчетов, которое необходимо сделать впоследствии. Так, чтобы проверить влияние температуры заливаемого металла на распределение брака в отливках сложной конфигурации, следует провести по крайней мере два совмещенных расчета заливки и затвердевания. Но так как температуру металла в литейных цехах измеряют при помощи пирометров, которые выдают неточные показания, количество таких расчетов, как правило, приходится увеличивать до 7—8.

На втором этапе необходимо создать трехмерную компьютерную модель отливки и литниковой системы в какой-нибудь системе трехмерного проектирования. На заводе в качестве таких систем используются пакеты Unigraphics и Solid Edge. Они наиболее удобны, потому что построены на том же графическом ядре, что и ProCAST. Это исклю-

чает некорректную передачу данных и упрощает процедуру построения сетки конечных элементов.

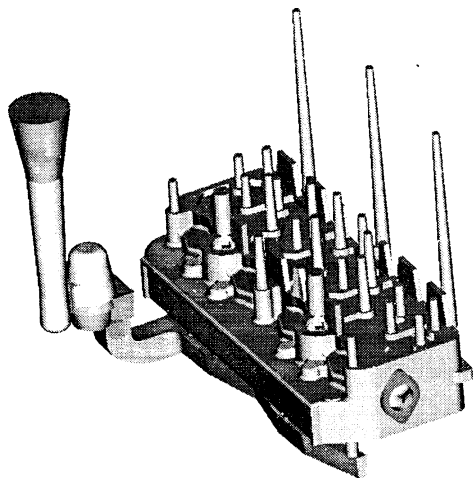
Остановимся на тех сложностях, которые мы встретили на данном этапе. Трехмерная компьютерная модель отливки и литниковой системы создается, как правило, по существующим чертежам. Но, во-первых, чертежи не могут точно описать сложные поверхности, которые в изобилии встречаются в отливках и даже в элементах литниковой системы. Во-вторых, при ручном изготовлении оснастки неизбежно возникают различные толкования сложных мест на чертеже. В результате реальная отливка имеет такую геометрию, какой ее представлял модельщик, а компьютерная модель отливки имеет такую геометрию, какой ее представлял инженер. Возникающие различия могут не считаться ошибками, а это значит, что исправлять их никто не будет. Но для ответа на вопрос: "Что же мы собираемся моделировать?" это имеет значение. И хотя при литье в землю такие отличия, как правило, не существенны, у нас был один случай, когда подобные расхождения оказали решающее влияние на характер распределения брака. При этом было потрачено 1,5 мес. на безрезультатные вычисления. По времени этот этап может занимать от 2 до 30 человеко-дней (в среднем 5—7 дней).

На третьем этапе трехмерные модели разбиваются на сетку конечных элементов. Именно в узлах этой сетки в дальнейшем производится вычисление скорости, давления и температуры расплавленного металла. Следовательно, чем больше узлов будет в этой сетке, тем более точными будут результаты расчета и тем больше времени потребуется на проведение моделирования. Для получения оптимальных размеров сетки желательно заранее определить, какой вид брака необходимо устранить. Например, если основной проблемой отливки является усадочная пористость,

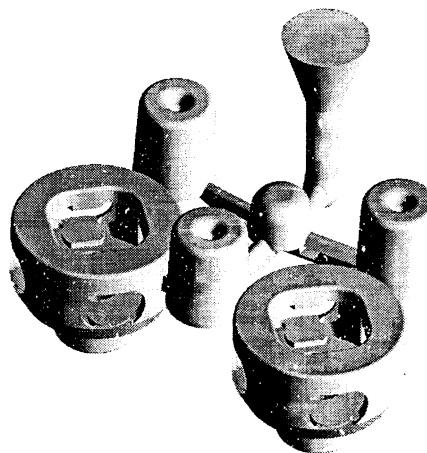
то в самой отливке (особенно в местах образования дефекта) делается более мелкая сетка, а в литниковой системе можно обойтись более крупной. Если необходимо избавиться от засоров, то гораздо больше внимания стоит уделять литниковой системе, чем самой отливке. Создание сетки оптимальных размеров может значительно сократить время расчета, при этом точность полученного результата не ухудшится. Если первые два этапа работы были проделаны качественно, то процедура разбиения на сетку конечных элементов даже в самых сложных случаях займет не более двух рабочих дней. В среднем же на эту процедуру уходит 2—3 ч.

На четвертом этапе основную работу берет на себя компьютер. Именно здесь производятся основные вычисления. На этом этапе необходимо добиться совпадения результатов моделирования на компьютере с реальным распределением брака в отливках. В результате расчетов должны быть выявлены условия, которые оказывают наибольшее влияние на появление дефектов в отливках, т. е. должен быть установлен механизм образования брака. Длительность этого этапа может колебаться в больших пределах по причинам, о которых уже говорилось выше.

Пятый этап по времени совмещается с четвертым. Технолог анализирует данные по мере их поступления и генерирует вопросы, которые требуют дополнительных расчетов. После того, как причина брака выяснена, поиск решения, позволяющего устранить ее, становится делом техники. Хотя и здесь случаются исключения. В результате моделирования головки блока цилиндров выяснилось, что при пониженном содержании углерода в чугуне (вблизи нижней границы, которую требует ГОСТ для чугуна данной марки) во внутренних частях отливки могут возникать усадочные дефекты. Такая ситуация подтверждается гидроиспыта-



Трехмерная компьютерная модель головки блока цилиндров. Отливка с литниковой системой



Трехмерная компьютерная модель водила. Отливка с литниковой системой

ниями и измерением химического состава бракованных отливок. Сразу можно предложить два решения: либо удерживать химический состав металла в более узких пределах, либо использовать прибыли в местах образования пористости. Однако существующее технологическое оборудование не позволяет удерживать химический состав в заданных пределах. Установка прибылей приведет к усложнению и без того сложной оснастки. Поэтому при поиске решения необходимы опыт и знание возможностей конкретного производственного процесса.

Шестой этап является, по сути, повторением работы, выполняемой на предыдущих этапах. Мы должны убедиться, что предлагаемое изменение технологии позволит получить положительный результат. Если же найдено несколько различных вариантов совершенствования технологии, то выбирается тот, который дает наилучший результат. Для этого готовим новую компьютерную трехмерную модель отливки и (или) литниковой системы и сетку конечных элементов для каждого варианта. После этого проводим моделирование каждого варианта, используя такие начальные и граничные условия, которые оказались наиболее тяжелыми для существующей технологии. Затем выбираем наилучший вариант и проводим еще 4—5 расчетов, проверяя устойчивость предлагаемого технологического процесса на изменение производственных условий. Проверка нескольких альтернативных вариантов изменения технологического процесса, конечно, может занять достаточно много времени. Однако, как правило, после анализа результатов предварительных расчетов квалифицированный технолог может сразу предложить приемлемое решение.

За год эксплуатации ProCAST в отделе было проанализировано 11 отливок. Были получены различные результаты. По восьми отливкам были получены положительные результаты. Это значит,

что описываемая в данной статье методика выполнена до конца, т. е. найдены варианты реализации литейной технологии, которые показывали отсутствие первоначального брака. Из них три отливки уже льются по измененной рекомендованной технологии, четыре отливки находятся на пути в производство. По одной отливке найденное решение пока не принято производством из-за сложности технологии. Анализ одной отливки не был доведен до конца, так как речь шла не о производственной необходимости, а об изучении возможностей компьютерного пакета и поиске адекватной модели для анализа газовой пористости.

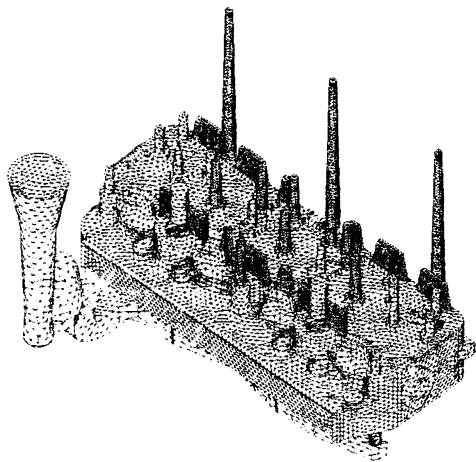
В процессе работы проводили хронометраж всех действий, который позволяет сегодня говорить о некоторых средних значениях трудоемкости и длительности процесса анализа технологического процесса:

- среднее время анализа одной отливки составляет 6 недель;
- среднее число выполненных расчетов по одной отливке — 8 (от 3—4 до 13—15);
- среднее время выполнения одного расчета — 30 ч (от 15 ч до 4 сут);
- среднее счетное время, время на проведение восьми расчетов с учетом перерывов на выходные дни и нерабочее время суток — 3 недели.

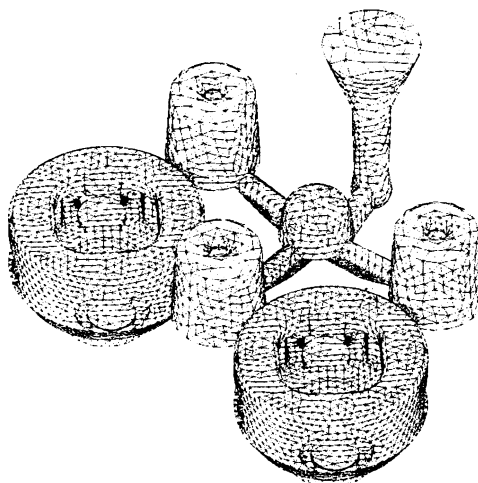
Собранные данные свидетельствуют о том, что при привлечении для анализа двух специалистов, работающих на одном месте, за год можно проанализировать 16 отливок.

Если считать, что вероятность получения положительного результата анализа сохраняется, то за год с помощью пакета ProCAST можно получить сокращение брака по 12 отливкам средней сложности или по 8 отливкам со сложностью, сопоставимой со сложностью головки блока цилиндров.

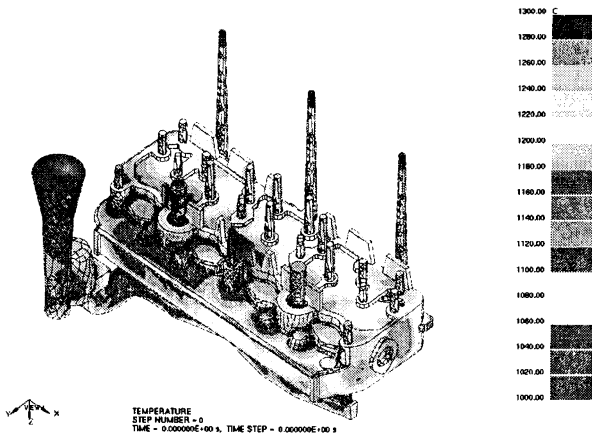
Для анализа экономической эффективности использования пакета ProCAST были выполнены расчеты возможной экономии от сокращения бра-



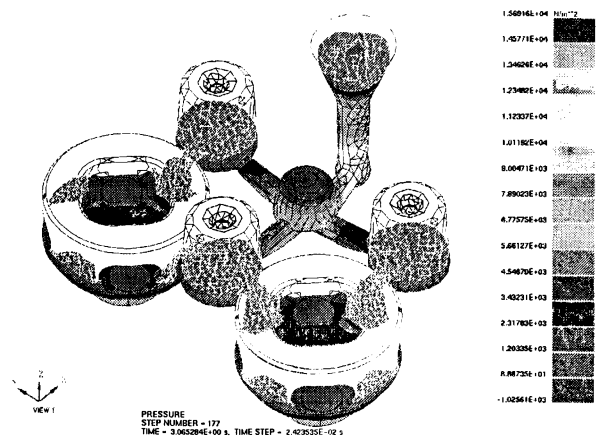
Сетка конечных элементов для отливки головки блока цилиндров



Сетка конечных элементов для отливки водила



Моделирование процесса затвердевания головки блока цилиндров



Моделирование процесса заливки водила

ка. Покажем, как это делалось на примере головки блока цилиндров 240-1003015.

Были собраны данные по браку по этой отливке за период с сентября 2000 г. по февраль 2001 г. Весь брак был расклассифицирован на устранимый и неустраняемый (неустраняемый брак связан с параметрами, не зависящими от геометрии отливки и литниковой системы).

В результате были получены следующие среднемесячные значения параметров:

- средняя программа выпуска — 3572 отливки;
- средний внутренний брак — 236 отливок;
- средний внешний брак — 274 отливки;
- средний устранимый внутренний брак — 149 отливок;
- средний устранимый внешний брак — 217 отливок.

По ценам на март 2001 г. затраты на изготовление одной отливки составляли 32 075 руб. Сюда входят стоимость материала (9 806 руб.) и зарплата на одну отливку (1 058 руб.). Цена отливки для ПО "ММЗ" составляла 40 784 руб. Тогда не трудно

определить, что не возмещаемые затраты на одну отливку при внутреннем браке составляют 21 740 руб., а при внешнем браке — 30 978 руб.

Существуют факторы (например, стабильность химического состава материалов), которые не позволяют устранить весь брак. Предположим, что удастся сократить брак на 60%. Тогда ежемесячное сокращение затрат на брак составит 5 984 109 руб., что примерно равно 4 603 \$. В год эта сумма составит 55 238 \$.

Так как мы говорили, что за год можно проанализировать технологический процесс по восьми отливкам со сложностью головки блока цилиндров, то годовой экономический эффект от использования пакета ProCAST составит 441 904 \$, что в несколько раз превышает затраты на оснащение рабочих мест необходимыми техническими и программными средствами.

Таким образом, опыт годичной эксплуатации показывает, что пакет имитационного моделирования процессов литья ProCAST является эффективным средством сокращения литейного брака.