

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А.А. Абрамов, О.А. Бройтман, М.Д. Тихомиров
(ФГУП «ЦНИИМ», г. Санкт-Петербург)

Компьютерные технологии начали широко использоваться в передовых отраслях техники еще в 60-70-е годы прошлого столетия, когда на предприятиях организовывались вычислительные центры, оснащенные большими вычислительными машинами. В этот период проводились работы по моделированию тепловых, аэродинамических, гидродинамических процессов, сложные прочностные расчеты, разрабатывались и применялись управляющие программы. Но наиболее активно компьютерные технологии стали применяться с массовым появлением персональных компьютеров.

В настоящее время особенно очевиден рост популярности компьютерного моделирования и среди литейщиков. На ведущих западных и отечественных литейных производствах процедура компьютерного моделирования становится стандартной при отработке технологии изготовления практически любой новой отливки. При помощи программного пакета у технолога-литейщика появляется возможность «проиграть» на компьютере процессы, протекающие при формировании отливки, и в случае получения брака на виртуальной модели отливки (а не в реальности) отследить ошибки, допущенные при разработке технологии, внести коррективы в технологию с учетом увиденного и снова проверить исправленную технологию на компьютере, и так вновь и вновь, вплоть до достижения оптимального результата, который и будет затем реализован в производстве. Моделирующие системы позволяют проследить гидродинамику и температуры в процессе заливки, температурный режим затвердевания отливки (что особо важно для выявления тепловых узлов) и различных элементов формы, спрогнозировать появление усадочных и ряда других дефектов. При просмотре результатов моделирования технолог получает возможность заглянуть как бы внутрь отливки, за счет чего быстро установить первопричину возникновения дефекта.

Система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон» ориентирована на точное и эффективное решение большинства проблем, возникающих при отработке литейных технологий [1-4], в том числе и задач изготовления различными способами литых ответственных отливок из алюминиевых сплавов.

Одной из поставленных перед системой моделирования задач являлся поиск усовершенствованного варианта технологии литья под низким давлением диска автомобильного колеса из алюминиевого сплава марки А356 (рис. 1). Ввиду нетехнологичной конфигурации отливки формировались усадочные дефекты в зоне перехода тонкой спицы к ободу, несмотря на усиленное воздушное охлаждение проблемной зоны со стороны боковых частей пресс-формы.

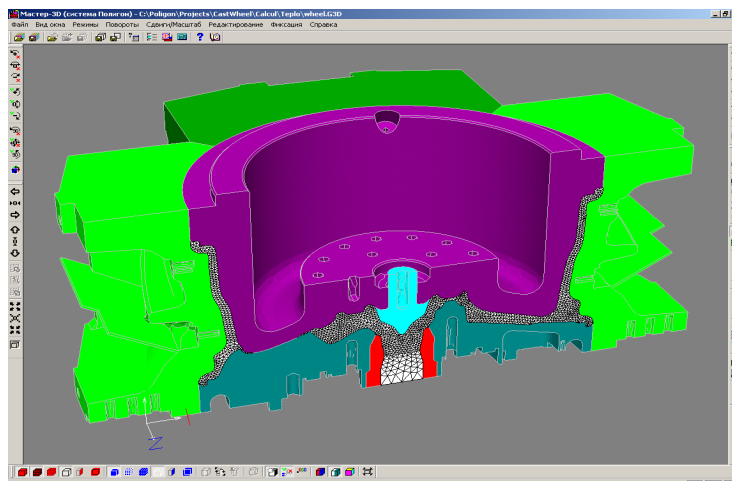


Рис. 1. Конечно-элементная геометрическая модель отливки и формы

На первом этапе исследовали процесс разогрева формы заливками металла для выявления количества циклов, необходимых для выхода процесса на рабочий режим (рис. 2). Выявлено, что на рабочий режим система отливка-кокиль выходит примерно на седьмой заливке. При установившемся режиме литья максимальная температура формы 520-530°C в месте соединения спицы с ободом, минимальная температура 350-360°C в верхней части обода. Продолжительность цикла на установившемся режиме составляет 300 с.

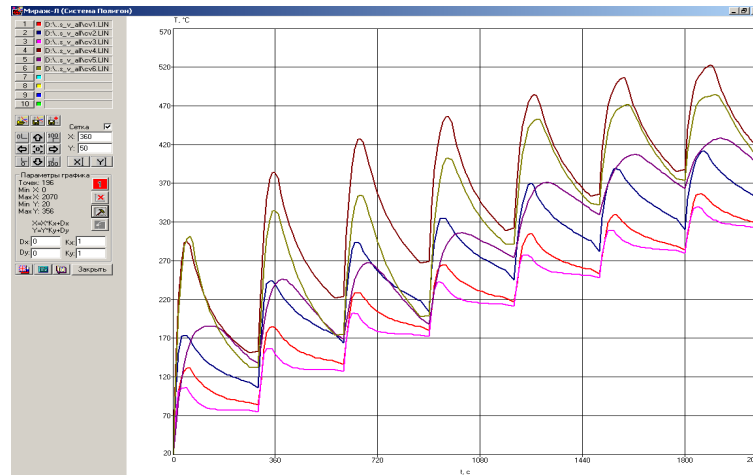
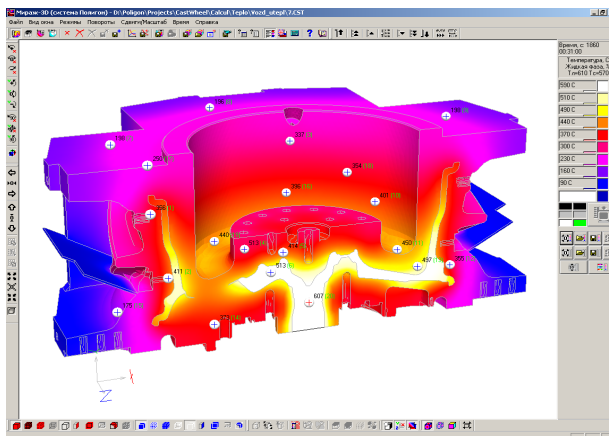
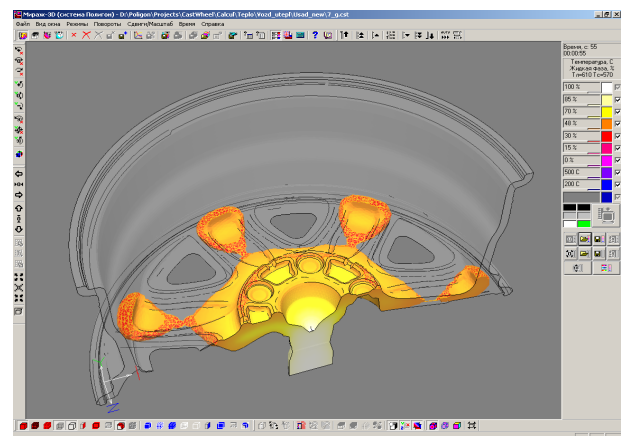


Рис. 2. Циклограмма процесса литья (кривые сняты для нескольких точек пресс-формы)

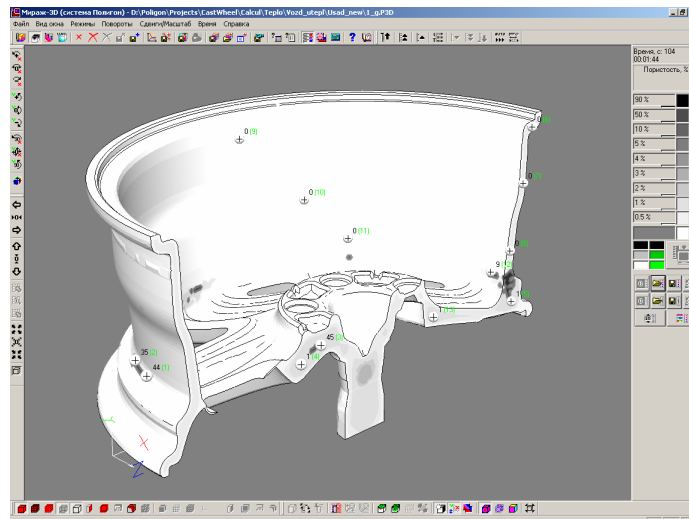
Несмотря на наличие сложной системы охлаждения формы и подпрессовки со стороны металлопровода при затвердевании отливки, что учитывалось при моделировании, распределение температур в отливке и пресс-форме складывается неблагоприятное. Это приводит к образованию изолированных от питания зон в районе перехода спиц к ободу и формированию в этих зонах пористости до 10% (рис. 3).



а



б



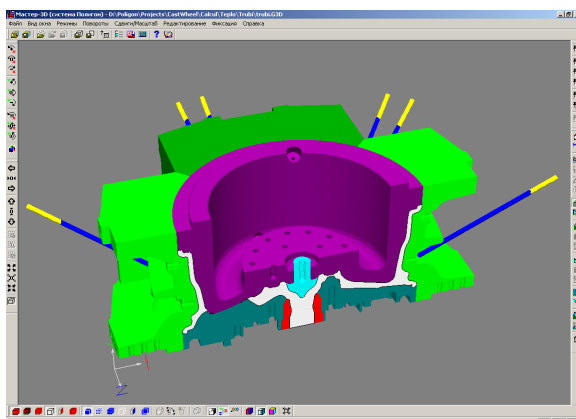
В

Рис. 3. Результаты моделирования литейных процессов для отливки диска автомобильного колеса

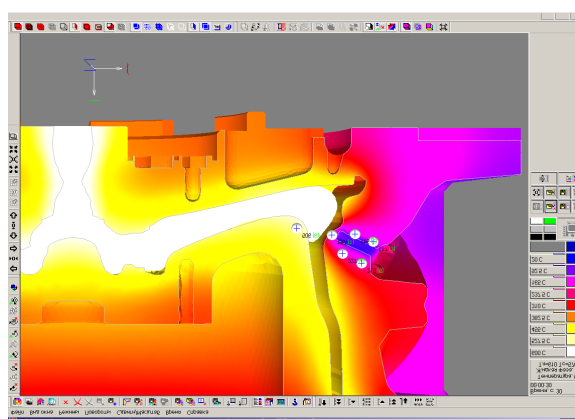
- а – температурные поля в форме и отливке на 60-й секунде от начала затвердевания;
 б – тепловые причины возникновения усадки: формирование изолированных от питания зон (тепловых узлов); в – распределение усадки в сечении отливки

Проверка при помощи моделирования различных вариантов решения проблемы показала, что предотвратить развитие значительной пористости возможно лишь только при значительно более мощном захлаживании теплового узла в зоне перехода спицы в обод. Одним из успешно промоделированных и воплощенных на практике вариантов усовершенствования технологии явилась установка тепловых труб (рис. 4, а). С помощью тепловых труб удастся довольно эффективно охлаждать пресс-форму в нужном месте (рис. 4, б), а, следовательно, и отводить тепло от проблемной зоны отливки, что обеспечивает направленность затвердевания отливки от периферии к металлопроводу. При этом пористость по всей отливке не превышает 1% (рис. 4, в). Полученные при моделировании количественные данные (тепловой поток, который необходимо обеспечить для захлаживания проблемной зоны) послужили основой для расчета и изготовления тепловых труб.

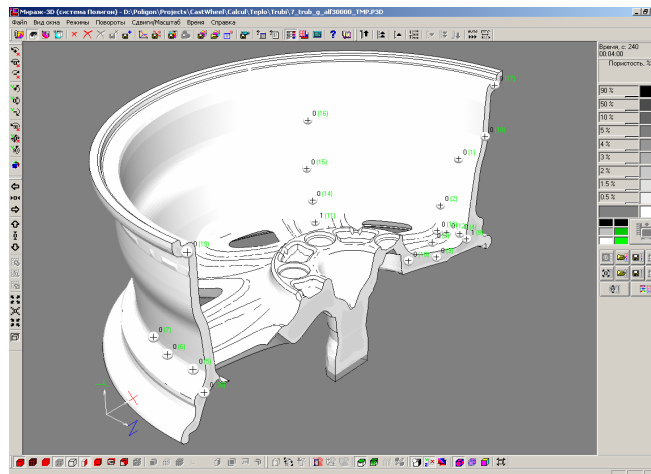
Приведенный пример демонстрирует широкие возможности компьютерного моделирования, в частности возможности СКМ ЛП «Полигон», для поиска нетривиальных технических решений при отработке технологии получения бездефектных отливок.



а



б



В

Рис. 4. Результаты моделирования затвердевания отливки в форме с установленными в нее тепловыми трубами
 а – конечно-элементная геометрическая модель отливки и формы с тепловыми трубами;
 б – поле температур в зоне установки тепловой трубы;
 в – распределение усадки в сечении отливки

В качестве другого примера корректировки технологии с применением моделирования можно привести задачу по изготовлению отливки блока цилиндров судового двигателя из алюминиевого сплава марки АК9ч в песчано-жидкостекольной форме с чугунными холодильниками (рис. 5). Затвердевание отливки «Моноблок» протекает в автоклаве при давлении 5 атм., что учитывалось при моделировании и, как показали сравнительные расчеты, достаточно эффективно влияет на предотвращение развитой микропористости [2].

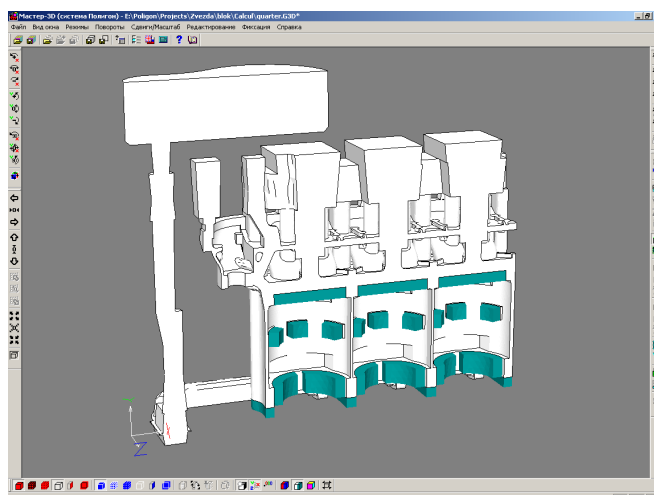
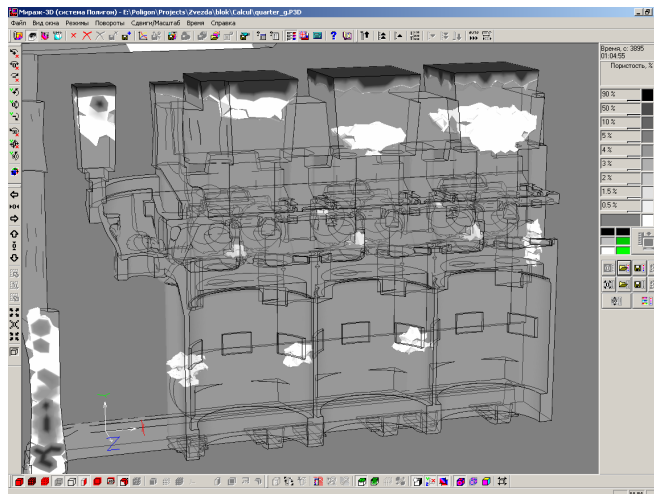
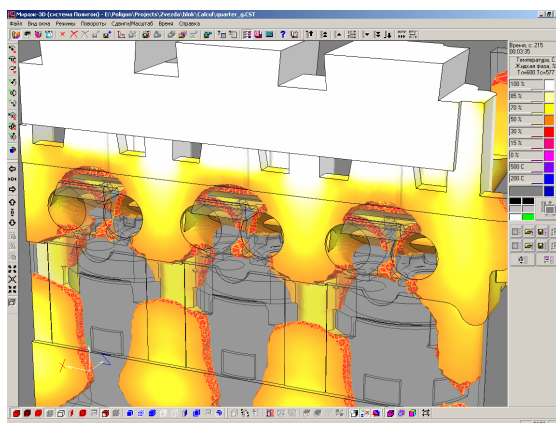


Рис. 5. Конечно-элементная геометрическая модель отливки «Моноблок» (показана 1/4 часть с чугунными холодильниками, песчаная форма скрыта)

В отливке, изготавливаемой по первоначально предложенной (базовой) технологии, формировалась небольшая макропористость (в среднем около 2%), которая, однако, вскрывалась при механической обработке и служила причиной растрескивания и нарушения герметичности (рис. 6, а). Посредством моделирования были выявлены причины формирования дефектов в отливке. Изучение характера затвердевания (рис. 6, б) позволило отследить места, требующие установки дополнительных холодильников (рис. 7, а). Проверка при помощи моделирования этого нового варианта технологии показала, что удастся получить отливку, лишенную существенных усадочных дефектов (рис. 7, б).



а



б

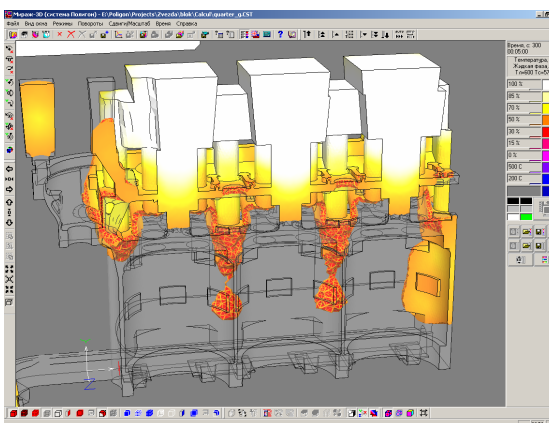
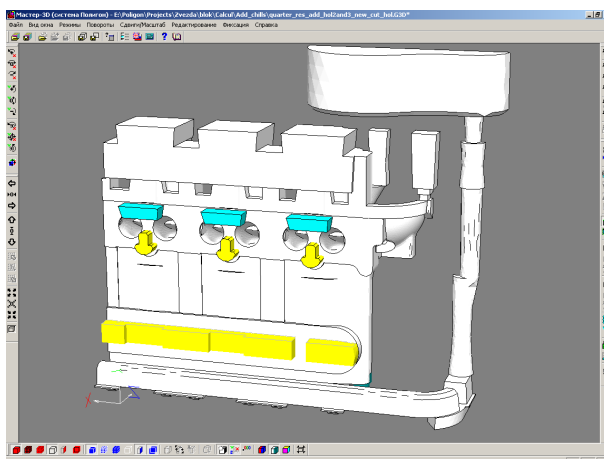
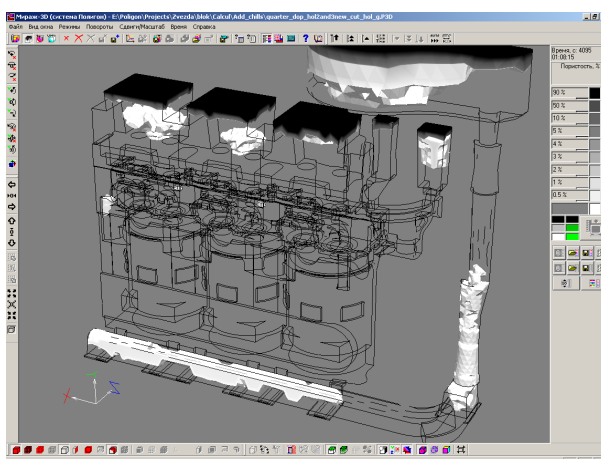


Рис. 6. Усадочные дефекты в теле отливки и тепловые причины их возникновения
а – зоны, в которых пористость выше 1%; б – отрыв от питания тепловых узлов



а



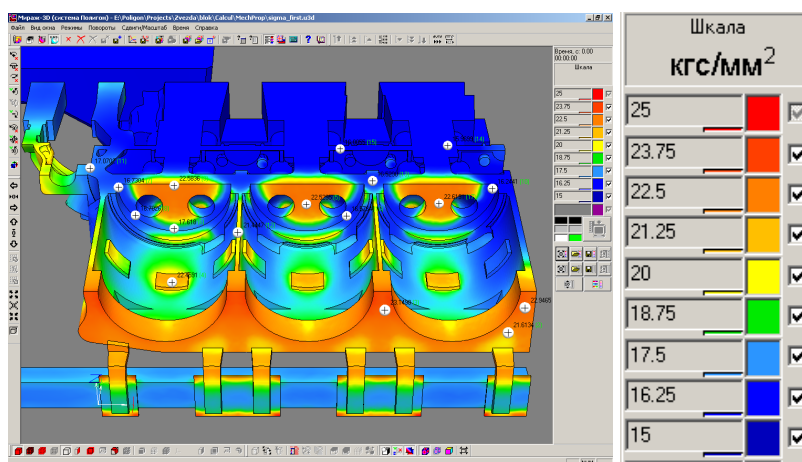
б

Рис. 7. Технология с дополнительными холодильниками (показаны желтым цветом)

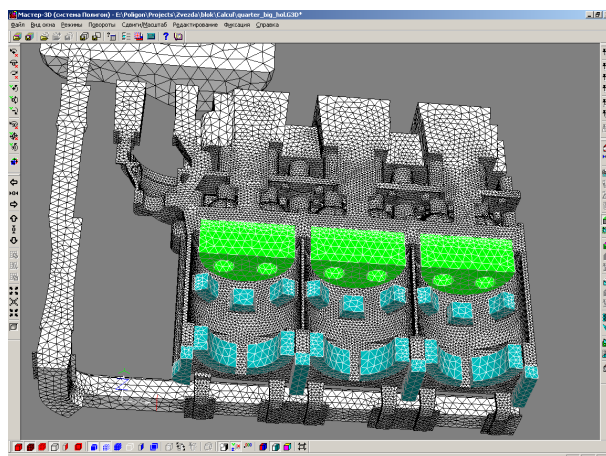
Другая задача по повышению качества отливки «Моноблок», решенная с применением моделирования, была связана с поиском условий получения заданного уровня механических свойств. Ужесточение сдаточного контроля потребовало обеспечения повышенной прочности в зоне дна камеры сжатия ($>17 \text{ кгс/мм}^2$) и ряде других зон отливки, которые подлежат контролю по механическим свойствам на вырезанных из отливки образцах. На практике, однако, не удавалось получить отливку, которая прошла бы такой ужесточенный контроль.

Прогноз механических свойств в отливке осуществлялся средствами встроенного в «Полигон» модуля критериального анализа [5], предназначенного для обработки расчетных полей, полученных при моделировании литейной технологии. В данном случае

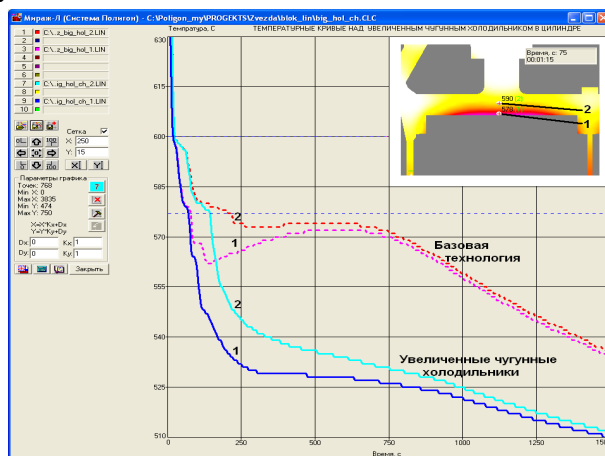
обработке подлежало поле температур во времени при затвердевании отливки. Первоначально поле температур в отливке, изготавливаемой по базовой технологии, было обработано на предмет установления скорости охлаждения в различных частях тела отливки. Исходя из рассчитанных значений скорости для мест вырезки образцов и статистическим данным по механическим свойствам в образцах (схема вырезки образцов и данные предоставлены были Заказчиком), были построены полиномиальные зависимости, связывающие прочность, а также пластичность со скоростью охлаждения. При построении полиномов результаты измерения механических свойств в различных местах отливки усредняли по предоставленным Заказчиком 12 вариантам заливки, исключая заведомо некорректные данные измерений (слом образца, разрыв за керном). Результат предсказания уровня прочности во всем теле отливки приведен на рис. 8, а.



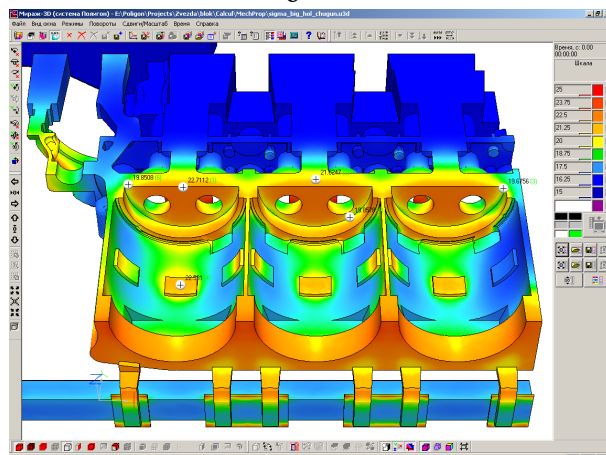
а



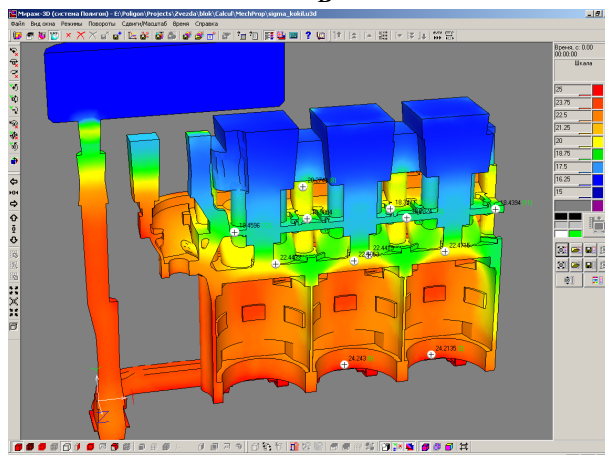
б



в



г



д

Рис. 8. Исследование путей повышения уровня механических свойств в отливке
а – распределение прочности (кгс/мм^2) в теле отливки, изготовленной по базовой технологии;

- б –необходимый размер холодильников, позволяющий обеспечить требуемый уровень свойств в прилегающей зоне дна камеры сжатия;
- в – температурный режим затвердевания в области дна камеры сжатия при увеличенных холодильниках;
- г – результат прогноза прочности при изготовлении отливки с увеличенными холодильниками;
- д – результат прогноза прочности при изготовлении отливки путем заливки в кокиль

Для обеспечения требуемого уровня механических свойств необходимо повышать скорость охлаждения отливки. Были исследованы пути обеспечения необходимого уровня свойств за счет небольших корректировок в технологии. Было показано, что лишь трехкратное (рис. 8, б) увеличение холодильника позволит настолько повысить скорость охлаждения в зоне дна камеры сжатия (рис. 8, в), что в ней будет гарантировано обеспечиваться требуемый уровень свойств (рис. 8, г). Однако, изготовление отливки с такими крупными холодильниками трудноосуществимо на практике. По результатам моделирования был сделан общий вывод о том, что незначительной корректировкой технологии невозможно получить необходимые свойства в прочих зонах отливки, куда затруднена или даже невозможна установка холодильников. Обеспечить необходимый уровень свойств в этой зоне возможно лишь при заливке в кокиль (рис. 8, д).

Приведенный пример демонстрирует широкие возможности компьютерного моделирования, в частности средствами СКМ ЛП «Полигон», для поиска условий получения отливок с заданным уровнем качества.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Тепловая задача. //Литейное производство, 1998, № 4, с. 30-34.
2. Тихомиров М.Д. Основы моделирования литейных процессов. Усадочная задача. //Приложение к журналу Литейное производство, 2001, № 12, с. 8-14.
3. Тихомиров М.Д., Комаров И.А. Основы моделирования литейных процессов. Что лучше – метод конечных элементов или метод конечных разностей. //Литейное производство, 2002, № 5, с. 22-28.
4. Бройтман О.А., Тихомиров М.Д. Система компьютерного моделирования литейных процессов ПОЛИГОН. //Сб. Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности. Материалы научно-практического семинара. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2004, с. 29-36.
5. Бройтман О.А. Критериальный анализ в САМ ЛП ПОЛИГОН. //Сб. Новые подходы к подготовке производства в современной литейной промышленности. Материалы II научно-практического семинара. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2005, с. 17-22.