

**Отчёт о моделировании литейной технологии для  
отливки «Цилиндр ВД наружный, нижняя половина»**

Исполнитель:

ООО «ФОКАД»  
инженер  
директор

Бройтман О.А.  
Сабиров Д.Х.

Заказчик:

ОАО «ЛМЗ»

Санкт-Петербург  
2003



## 1. Постановка задачи

Ставилась задача по моделированию литейной технологии для отливки «Цилиндр ВД наружный, нижняя половина». Отливка изготавливается литьём в комбинированную форму. Необходимо было оценить возможность получения здоровой отливки при существующей технологии и при внесении ряда изменений в эту технологию.

Отливка изготавливается из стали марки 15X1M1ФЛ, температура заливки 1580 – 1560°C, заливка производится до поднятия уровня металла в прибылях на 250 – 300 мм, далее производится полное заполнение прибылей с помощью устройства «жук» (время, проходящее от момента частичного заполнения прибылей до полного их заполнения – около 10 мин.). Материалы формы даны ниже.

## 2. Этапы моделирования

Первоначально в CAD-системе SolidWorks была построена геометрическая модель отливки и формы. Собранная форма показана на рис. 2.1.

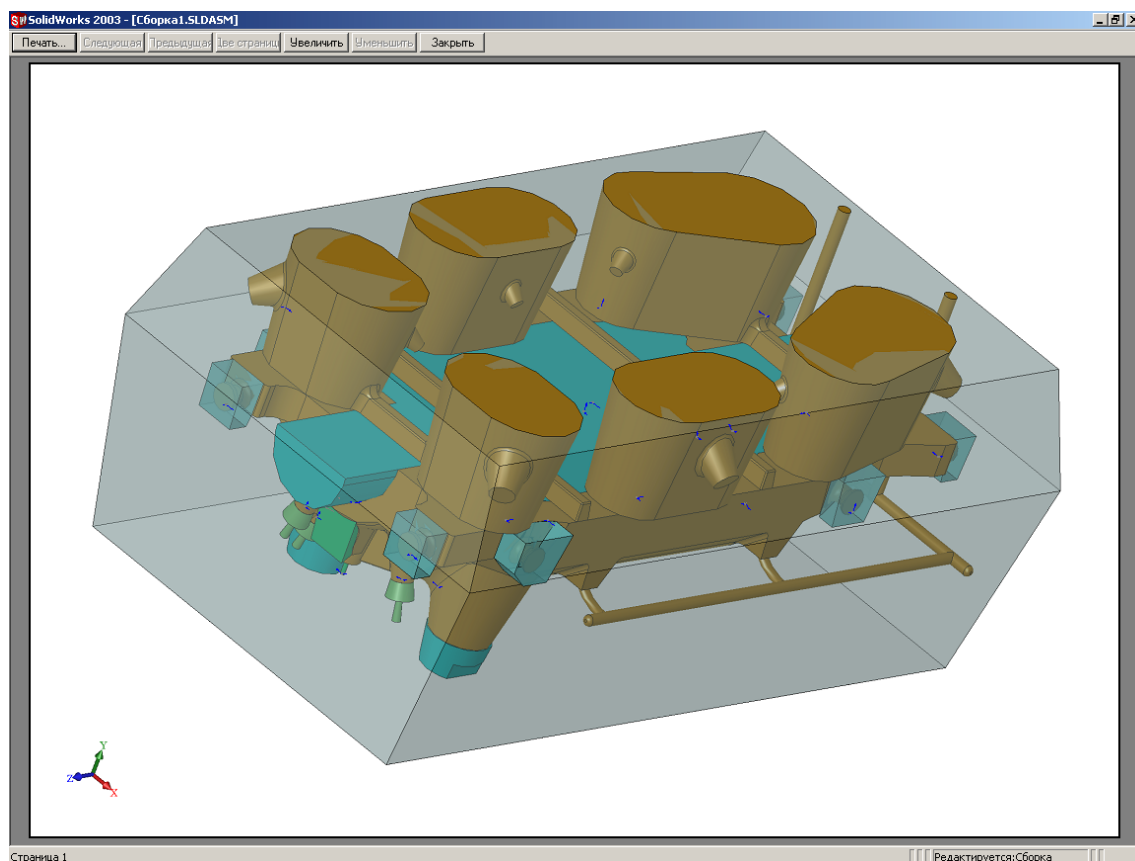
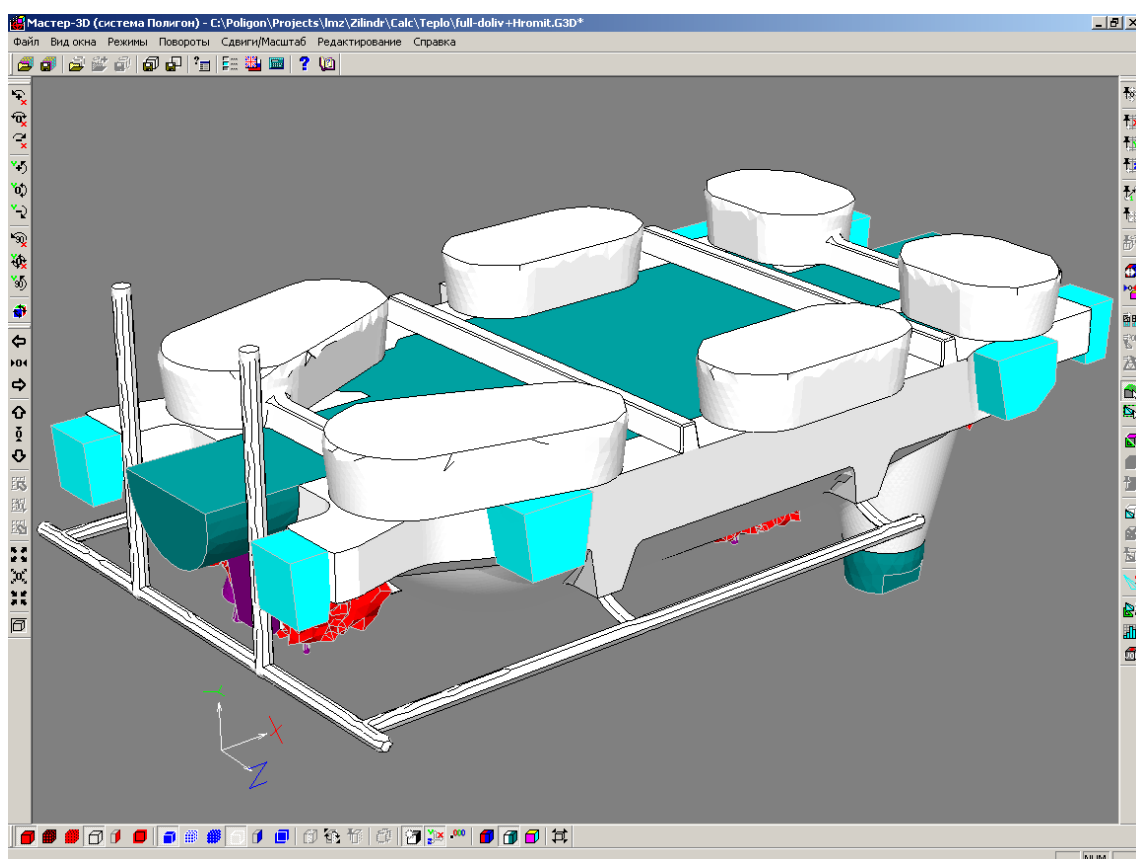


Рис. 2.1. Геометрическая модель, направляемая на генерацию КЭ-сетки

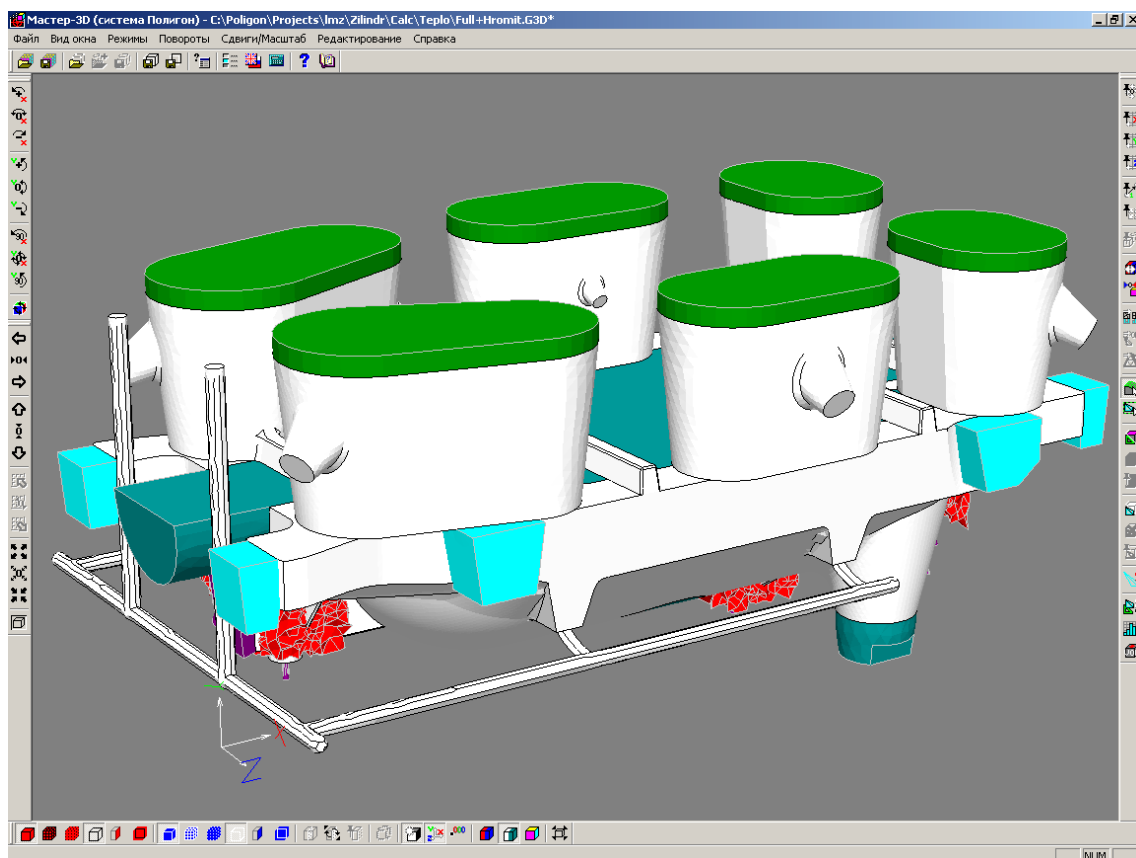
На следующем этапе для имеющегося геометрического образа объекта моделирования была сгенерирована конечно-элементная (КЭ) сетка в объёмах отливки и во всех объёмах формы. Технология предусматривает доливку прибылей после определённой выдержки, поэтому было создано две КЭ-модели: с частично заполненными прибылями и полностью заполненными. Полученные КЭ-сетки были импортированы в систему компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон». В препроцессоре системы «Полигон» импортированные сетки редактировались – модель ориентировалась в пространстве относительно вектора силы тяжести, назначались индексы границ и объёмов, были выделены в отдельные объёмы совокупности элементов для описания геометрии слоёв засыпки. Подготовленная конечно-элементная сетка затем передавалась в расчётный модуль – собственно процессор системы «Полигон». Полученные расчётные



геометрические модели представлены на рис. 2.2 (одноимённые типы объёмов показаны одинаковыми цветами).

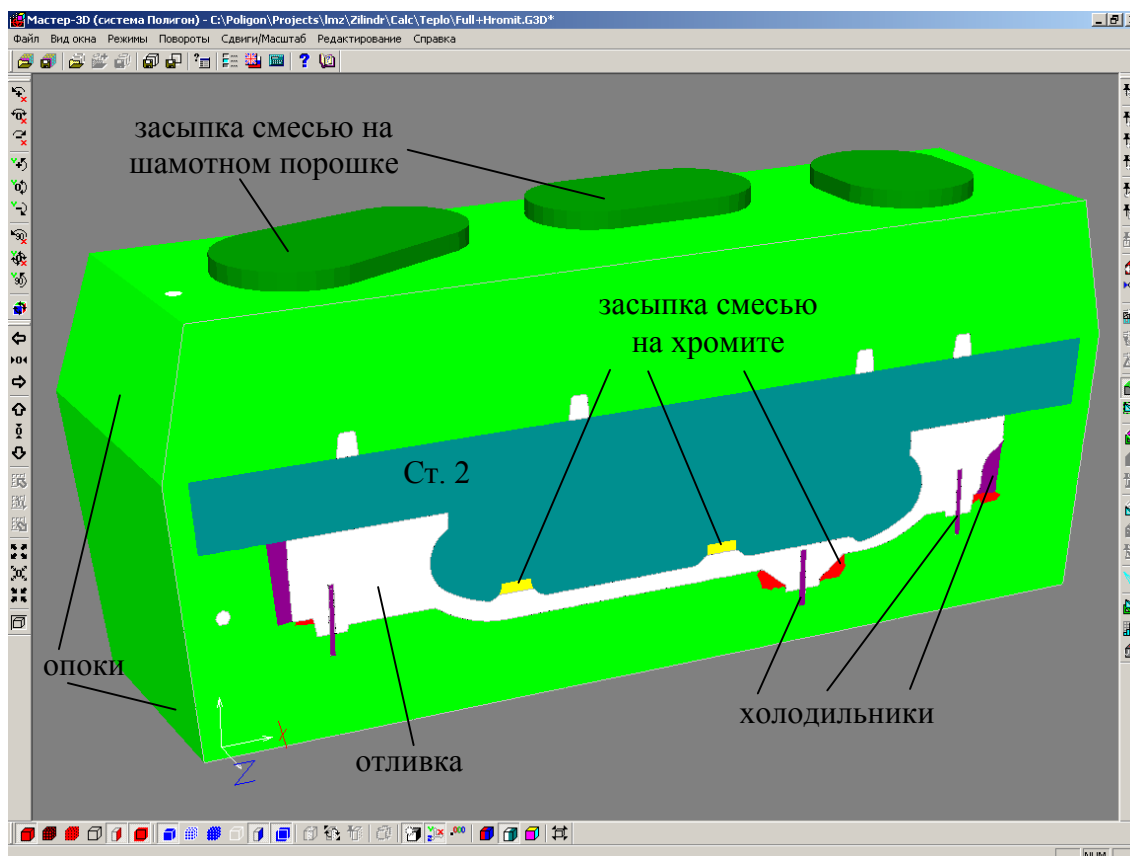


а



б





В

Рис. 2.2. Геометрические КЭ-модели

- а – модель с частично заполненными прибылями (опоки скрыты);  
 б – конечная модель с полностью заполненными прибылями (опоки скрыты);  
 в – конечная модель, показано сечение

Следующий этап – задание теплофизических свойств материалов отливки и формы, а также усадочных свойств сплава. Теплофизические свойства материалов формы и отливки, равно как и усадочные свойства сплава, были взяты из внутренней базы данных «Полигона» и подключённой к пакету справочной системы. Поскольку температура ликвидус у применяемого сплава  $\approx 1510^{\circ}\text{C}$ , солидус  $\approx 1475^{\circ}\text{C}$ , то можно отметить невысокий перегрев, что, очевидно, благоприятно с точки зрения предотвращения внутренних дефектов.

Материал основной формы – смесь №17; стержни 1а, 1б – смесь №9, стержни 2, 3, 4а, 4б, 5а, 5б – смесь №14. Холодильники №1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 (наружные) выполняются из стали марки 25Л, №8, 9, 10 (внутренние) – ст. 3\*.

Исходя из условий технологического процесса, расчёты, проводимые на следующем этапе моделирования, проводились на 2-х моделях.

Вначале, на основе модели, приведённой на рис. 2.2а, решалась задача об охлаждении металла в форме в течение 10 мин. Далее, полученные расчётные поля температур в отливке и форме, полученные в результате описанного расчёта, загружались как стартовые поля температур перед продолжением процесса затвердевания, но уже с заполненными прибылями. При этом расчёты велись уже по модели, представленной на рис. 2.2б, и доливка прибылей учитывалась присвоением соответствующей области в отливке повышенной температуры, температуры доливки –  $1565^{\circ}\text{C}$  (рис. 2.3). На рис. 2.3 различные части отливки окрашены в разные цвета, согласно принятой шкале температур

\* Согласно обозначениям на чертеже №1422198, технологическим картам и «Таблице составов формовочных смесей».



(шкала на рисунке – справа) и присвоенных различным температурам цветов, которые соответствуют определённым значениям температуры в тех или иных местах отливки.

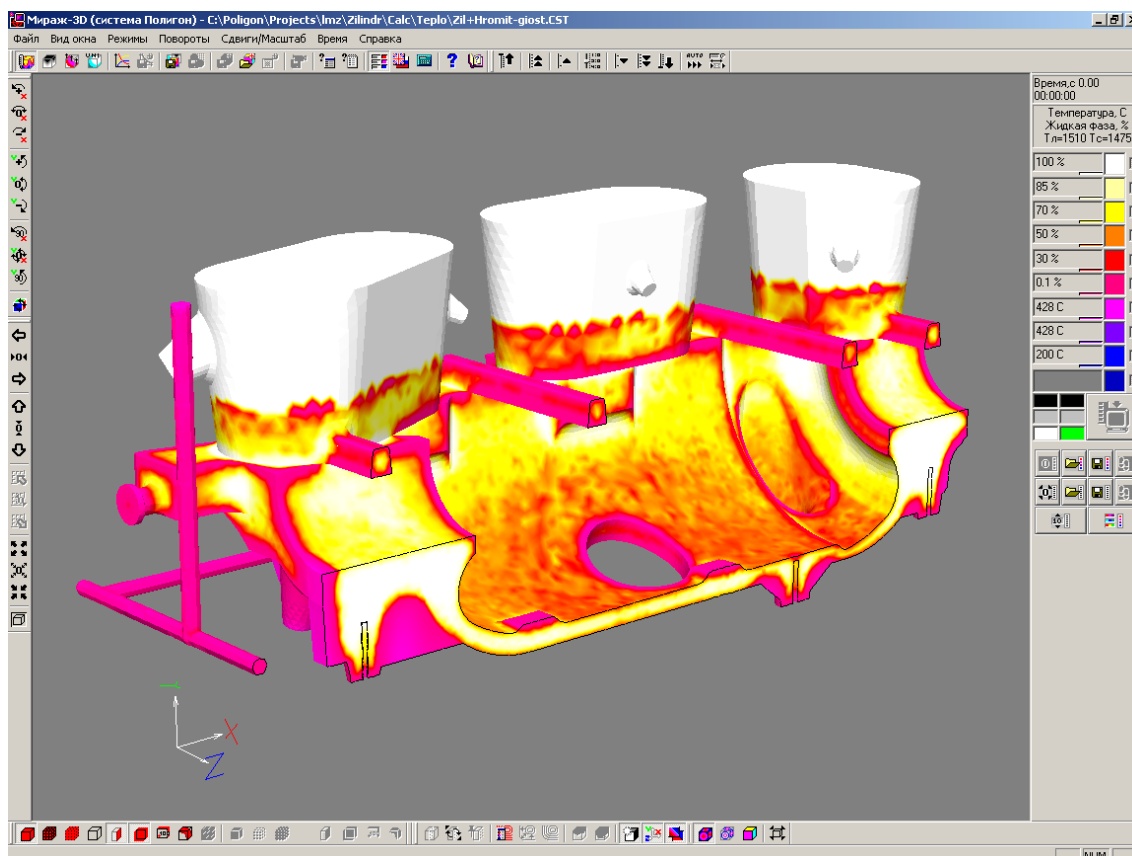


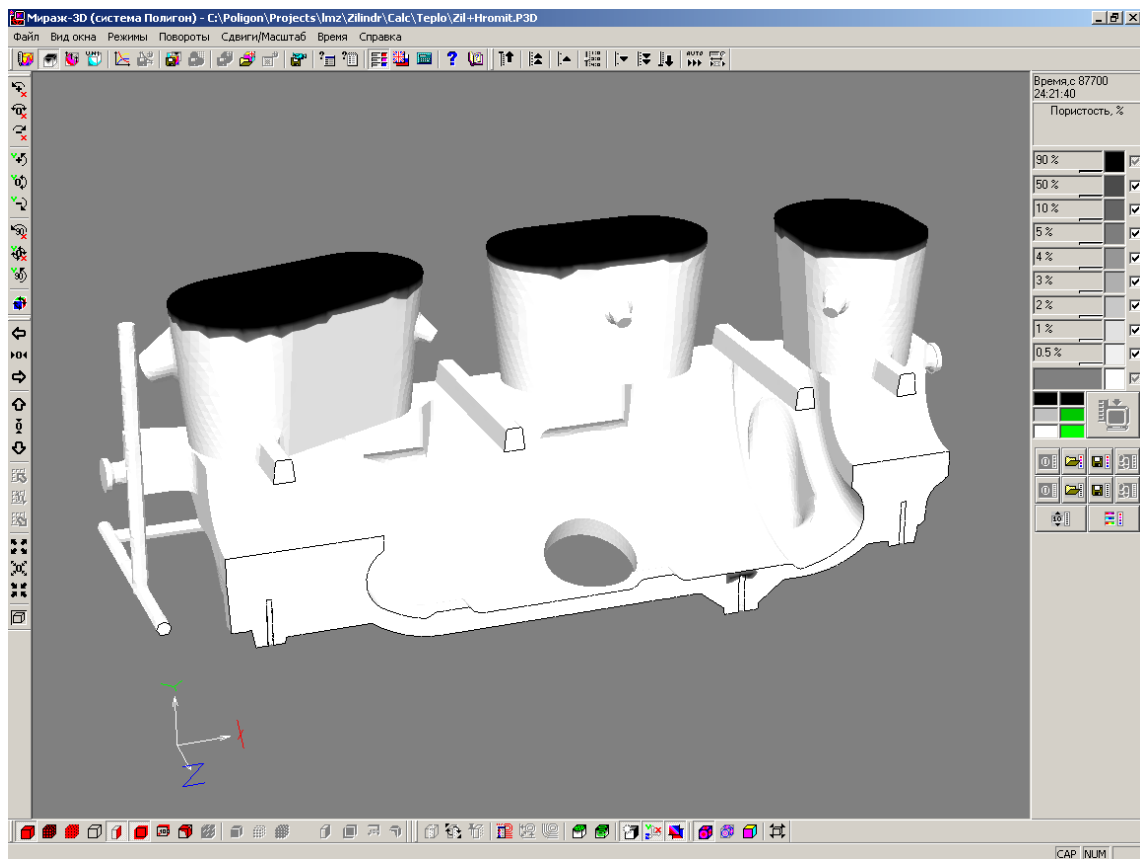
Рис. 2.3. Поле температур в отливке после доливки прибылей (шкала оцифрована на процент жидкой фазы, показано сечение)

Результаты расчёта усадочных дефектов приведены на рис. 2.4 и 2.5.

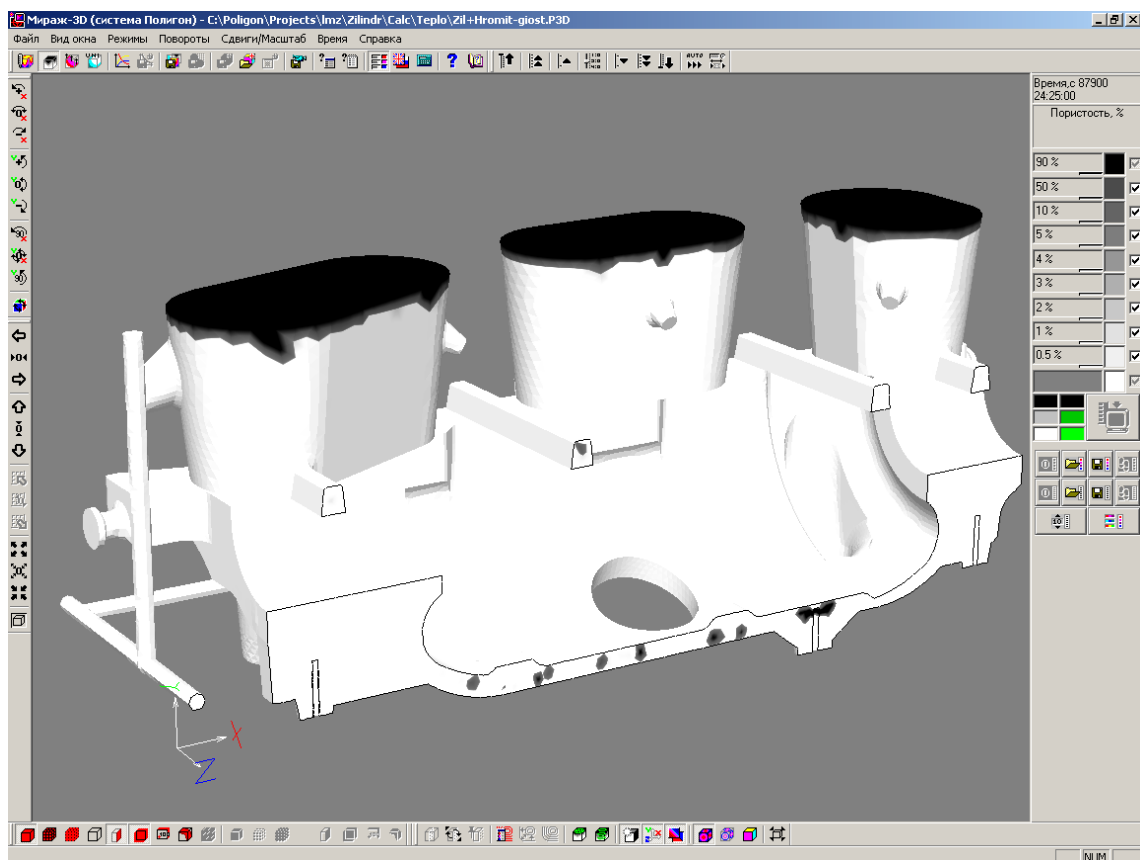
Здесь необходимо ввести понятие об используемой в «Полигоне» модели о сложной структурированности двухфазной зоны. В «Полигоне» используется понятие о трёх критических точках, характеризующих количество жидкой фазы в некотором объёме в определённый момент времени, определяющих процесс питания и, как следствие, формирования усадочных дефектов. Это точка начала линейной усадки  $P_1$ , точка прекращения гравитационного течения жидкости  $P_2$ , точка полного перекрытия междендритных каналов  $P_3$ . Критические точки существенно зависят от способа приготовления расплава, от характерных скоростей охлаждения в интервале затвердевания и ряда других параметров. Вопрос о точном определении критических точек представляется некорректным, поскольку в реальных условиях они меняются в широких пределах. Поэтому логично при ответственном моделировании варьировать данные неконсервативные параметры, чтобы оценить устойчивость имеющейся технологии к экстремальным значениям критических точек.

Из рис. 2.4 и 2.5 видно, что наиболее уязвимой частью тела отливки с точки зрения формирования дефектов является донная область, так называемая «спинка». При этом с уверенностью можно говорить о неизбежном формировании усадки в области прилива, внутри которого установлен стальной холодильник. На «жёстких» условиях появляется ещё ряд дефектов, которые являются следствием разнотолщинности различных частей «спинки», наличия в ней отверстий. При этом очевидно, что захлаживающей способности хромитовой засыпки недостаточно для обеспечения бездефектности в зоне, приближенной к внутренним приливам на «спинке».





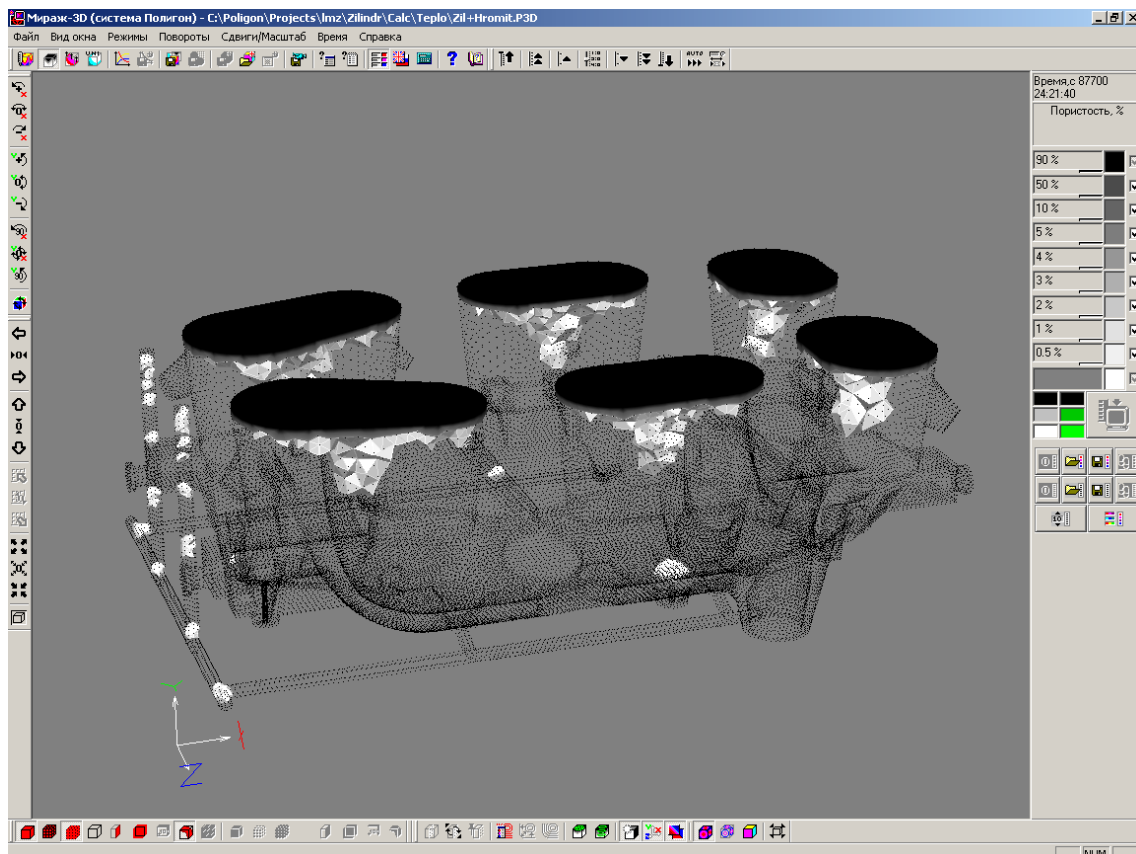
а



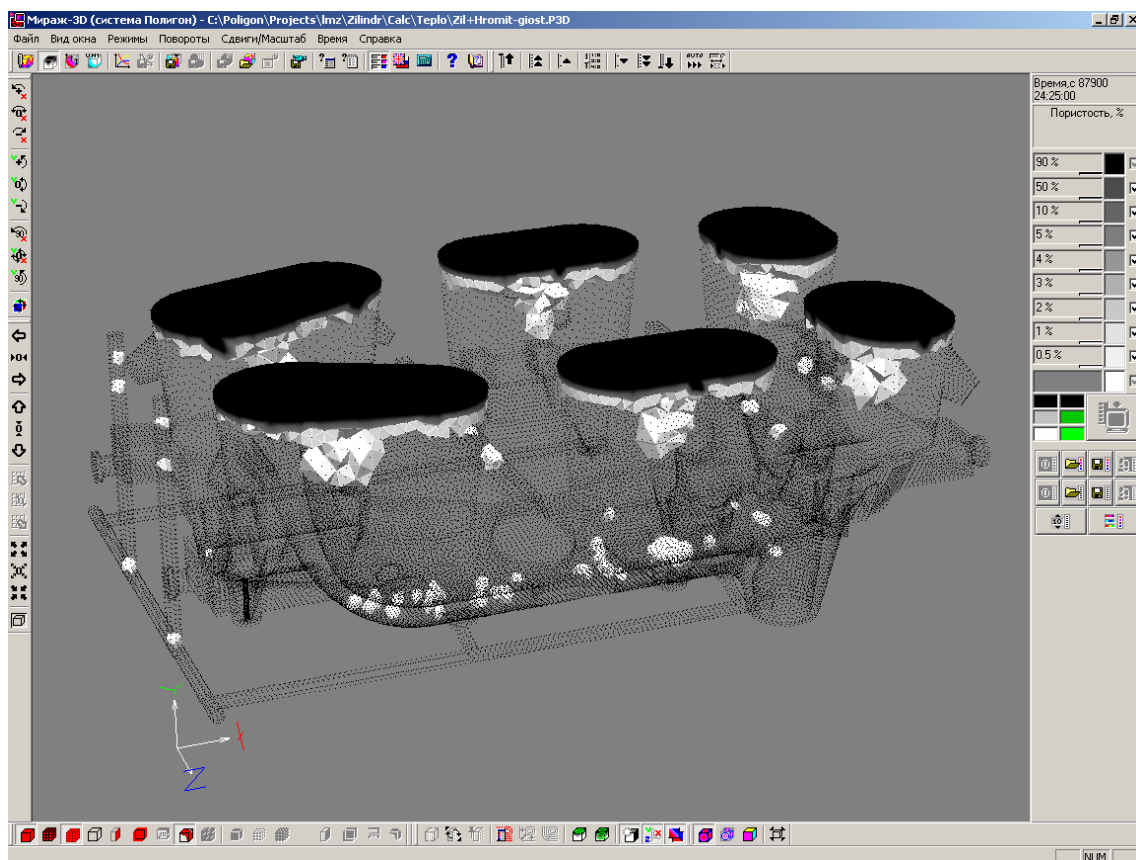
б

Рис. 2.4. Усадочные дефекты в теле отливки (сечение)  
 а – при задании «мягких» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,25$ ,  $P_3=0,10$ ;  
 б – при задании «жестких» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,49$ ,  $P_3=0,48$





а



б

Рис. 2.5. Усадочные дефекты в теле отливки  
(пористость выше значения изоповерхности в 2%)

а – при задании «мягких» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,25$ ,  $P_3=0,10$ ;

б – при задании «жестких» условий на усадку:  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,49$ ,  $P_3=0,48$



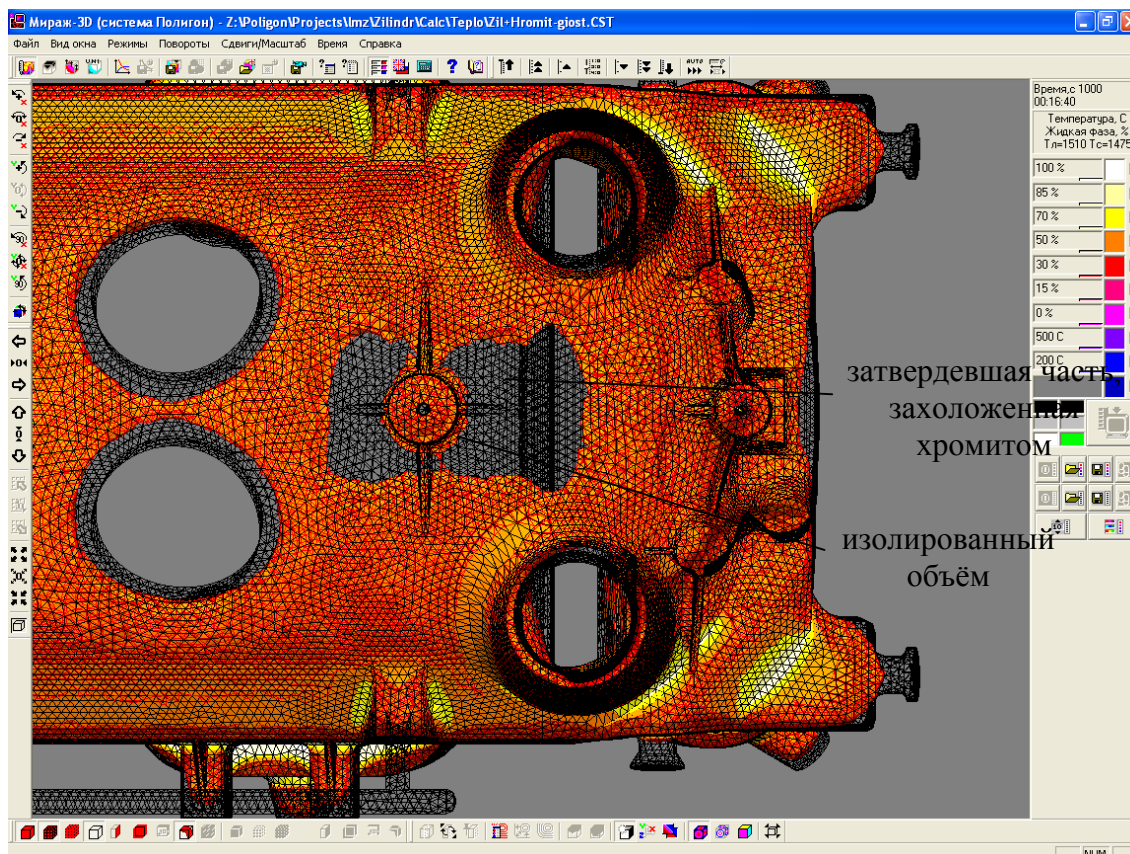


Рис. 2.6. Формирование дефекта в зоне прилива, прослеженное при помощи вывода зон выше значения изоповерхности в 50% жидкой фазы. Показан момент отрыва неблагоприятной зоны от питания

Просматривая результаты расчёта в «Полигоне», можно вывести на экран изоповерхности (поверхности равных значений пористости либо температур, скоростей, доли жидкой фазы и проч.), зоны выше или ниже заданного значения изоповерхности. Этот инструмент очень удобен для определения зон изоляции объёмов жидкого металла: на экране не отображаются уже затвердевшие части отливки, наблюдаем лишь те, в которых есть жидкая фаза.

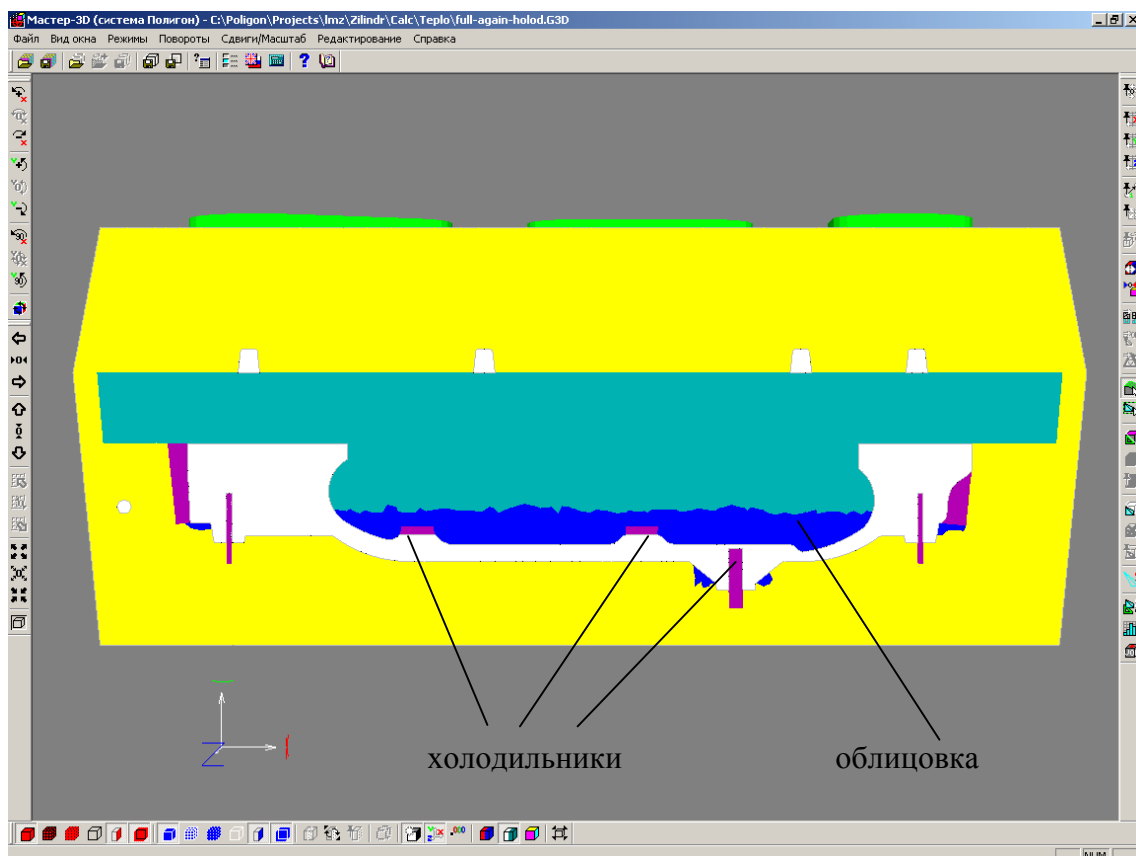
На рис. 2.6 выведены зоны выше определённого значения изоповерхности для иллюстрации процесса образования изолированного объёма жидкости. Поскольку прилегающая к тепловому узлу тонкая часть «спинки» также оказывается под воздействием захлаживающей способности хромита, то она затвердевает раньше, чем захлаживаемый тепловой узел. При этом высверливаемого внутреннего холодильника, помещённого в центре прилива явно недостаточно. Анализ температурных полей в форме, имеющих место в процессе затвердевания отливки, показывает, что из-за малой массы этот холодильник быстро прогревается. Температура холодильника достигает температуры окружающего его расплава почти сразу после снятия перегрева над ликвидусом.

Образование прочих дефектов в «спинке» происходит по аналогичному механизму – недостаточно захлаживаются соответствующие тепловые узлы.

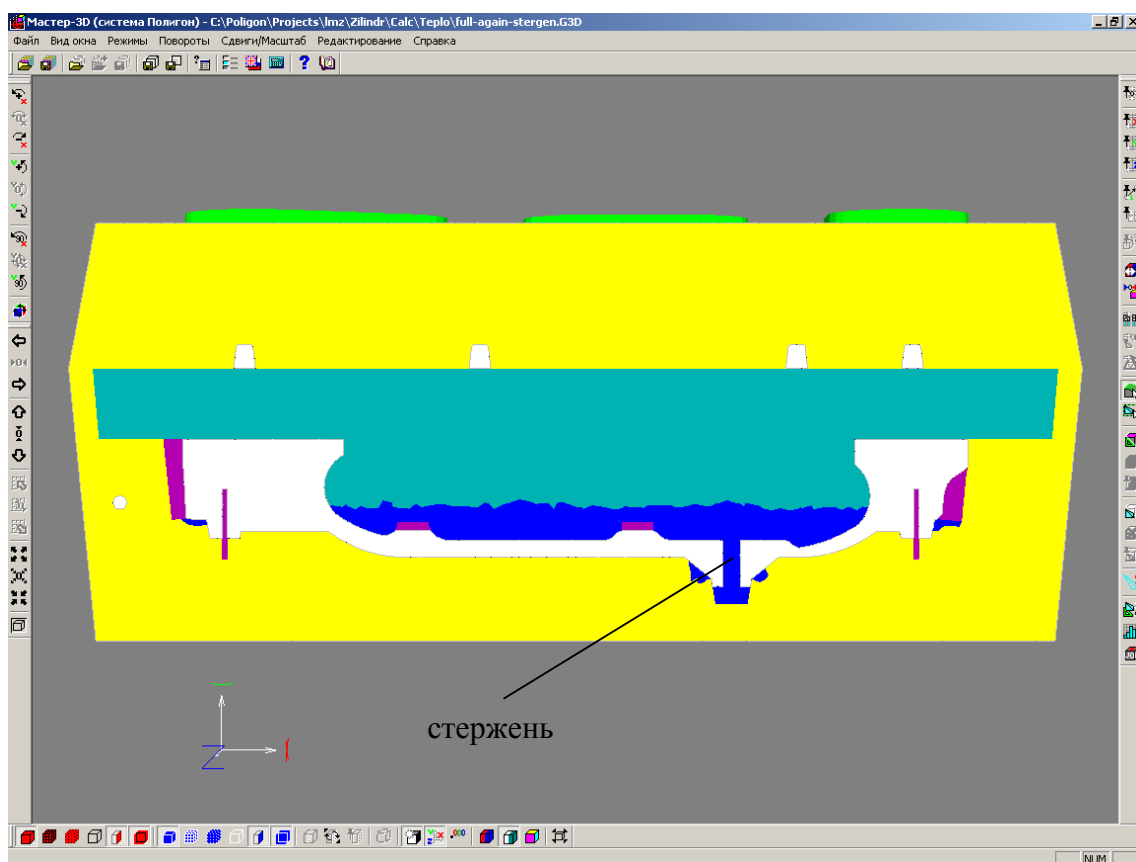
Руководствуясь результатами проведённых расчётов, заводские специалисты-технологи предложили несколько изменений в литейной технологии:

- 1) заменить хромитовую засыпку на внутренних приливах на стальные холодильники высотой 50 мм;
- 2) облицевать стержень №2 хромитом на 1/3 от высоты стержня;





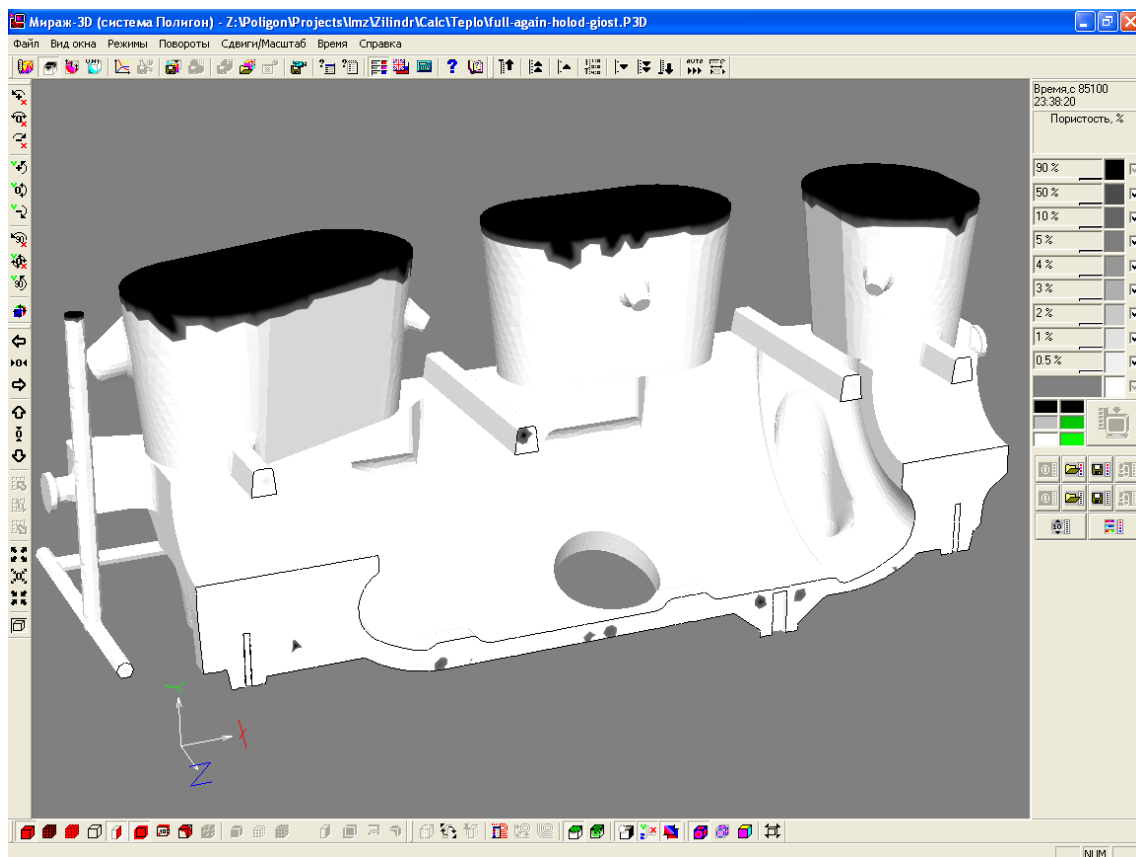
а



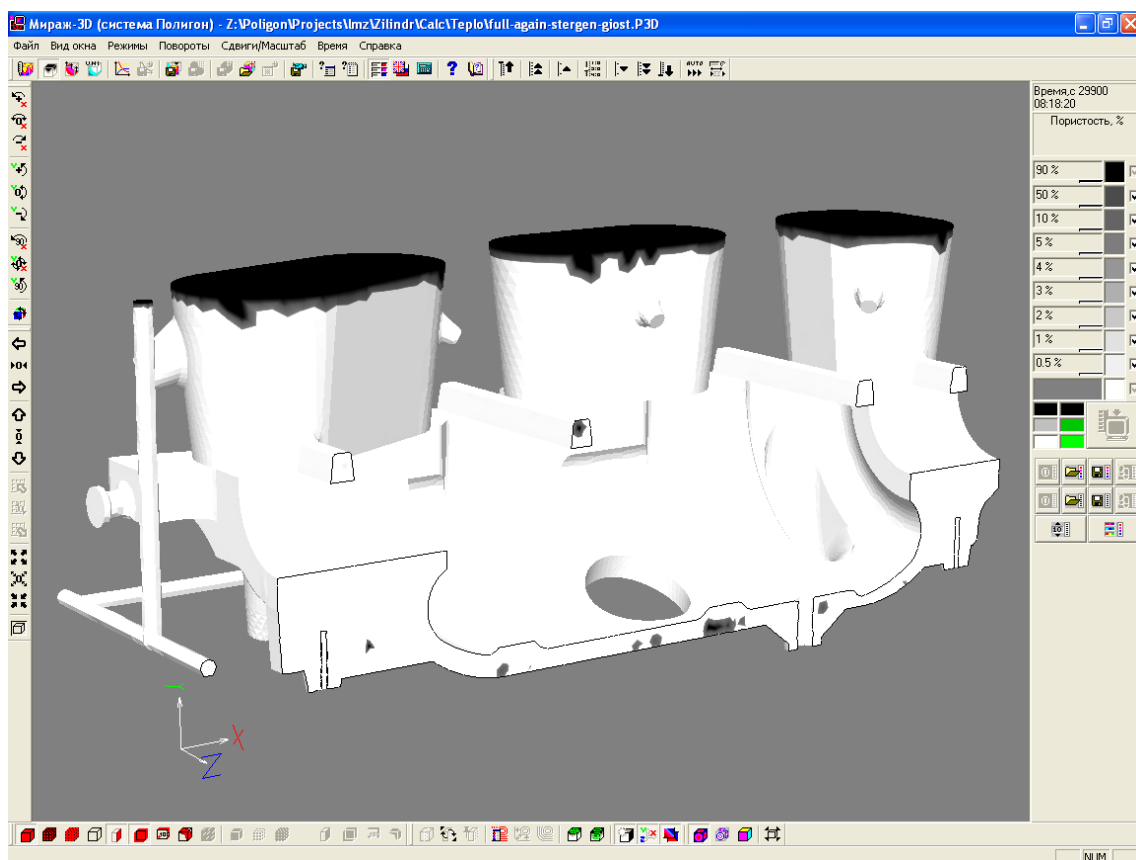
б

Рис. 2.7. Изменения в технологии (показаны сечения)  
а – изменённая технология с установленным увеличенным холодильником;  
б – изменённая технология с установленным хромитовым стержнем





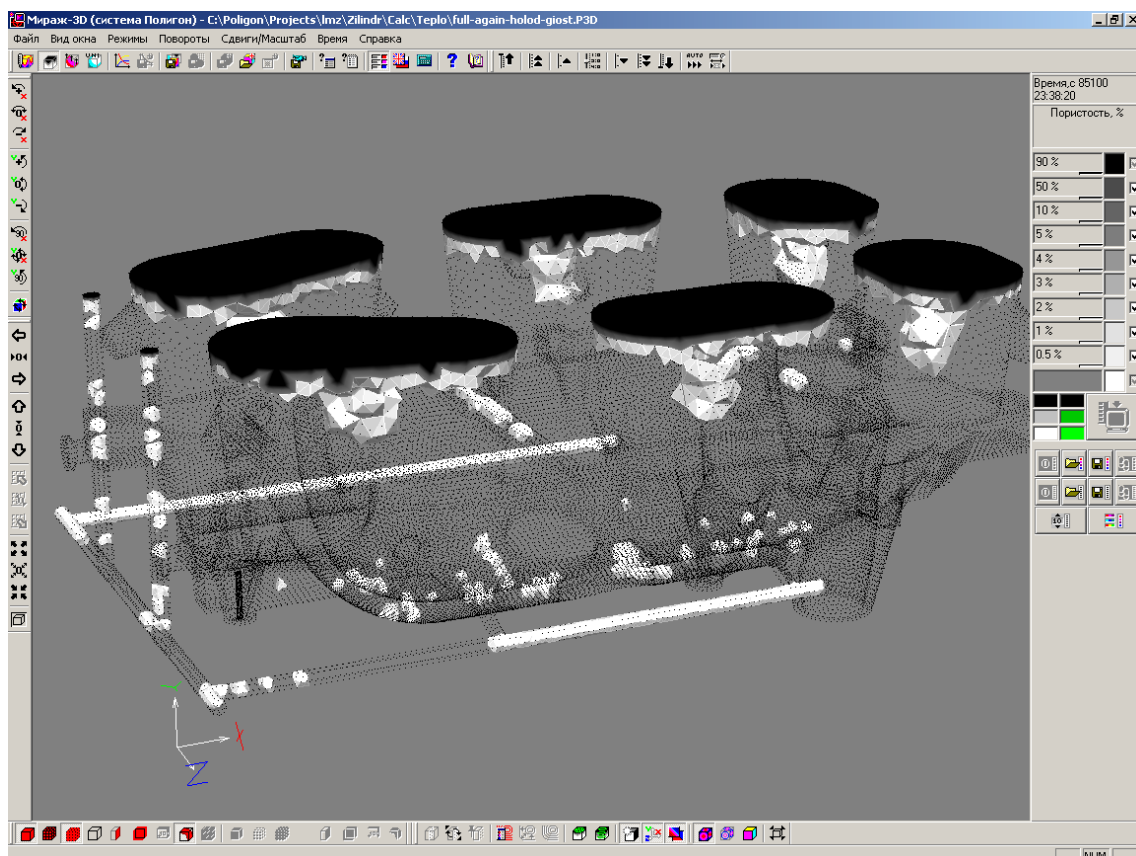
а



б

Рис. 2.8. Усадочные дефекты в отливке при применении изменённой технологии (сечение;  
 $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,49$ ,  $P_3=0,48$ )  
 а – увеличен холодильник;  
 б – установлен хромитовый стержень





а

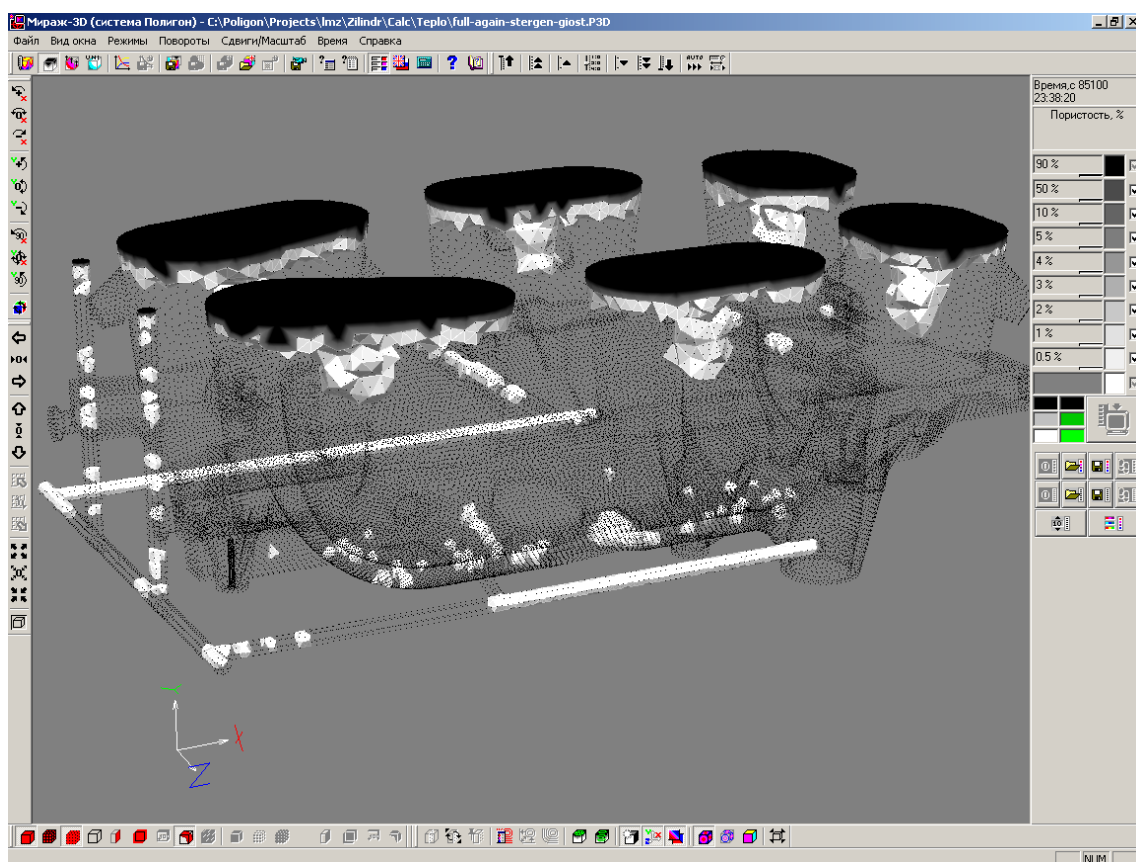


Рис. 2.9. Усадочные дефекты в отливке при применении изменённой технологии (пористость выше значения изоповерхности в 2%;  $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,49$ ,  $P_3=0,48$ )

а – увеличен холодильник;

б – установлен хромитовый стержень



- 3) а) первый вариант – увеличить диаметр высверливаемого холодильника в проблемном приливе до 80 мм (рис. 2.7а);  
б) второй вариант – установить на место высверливаемого холодильника хромитовый стержень диаметром 100 мм (рис. 2.7б).

Результаты расчётов по новым вариантам технологии приведены на рис. 2.8 и 2.9. Очевидно, что поражённая дефектами зона в «спинке» понизилась. В обоих вариантах дефект уходит из области наружного прилива и смещается в область под внутренним приливом. В случае со стержнем это смещение более значительно. Это явление вызвано несбалансированностью захлаживающего эффекта от хромитового стержня (либо увеличенного внутреннего холодильника) и от холодильника на внутреннем приливе (рис. 2.10). Внешний прилив и приближенная к нему зона затвердевают достаточно быстро, в отличие от иных рассмотренных вариантов технологии, в которых эта зона затвердевала позже и дольше питала данную часть отливки.

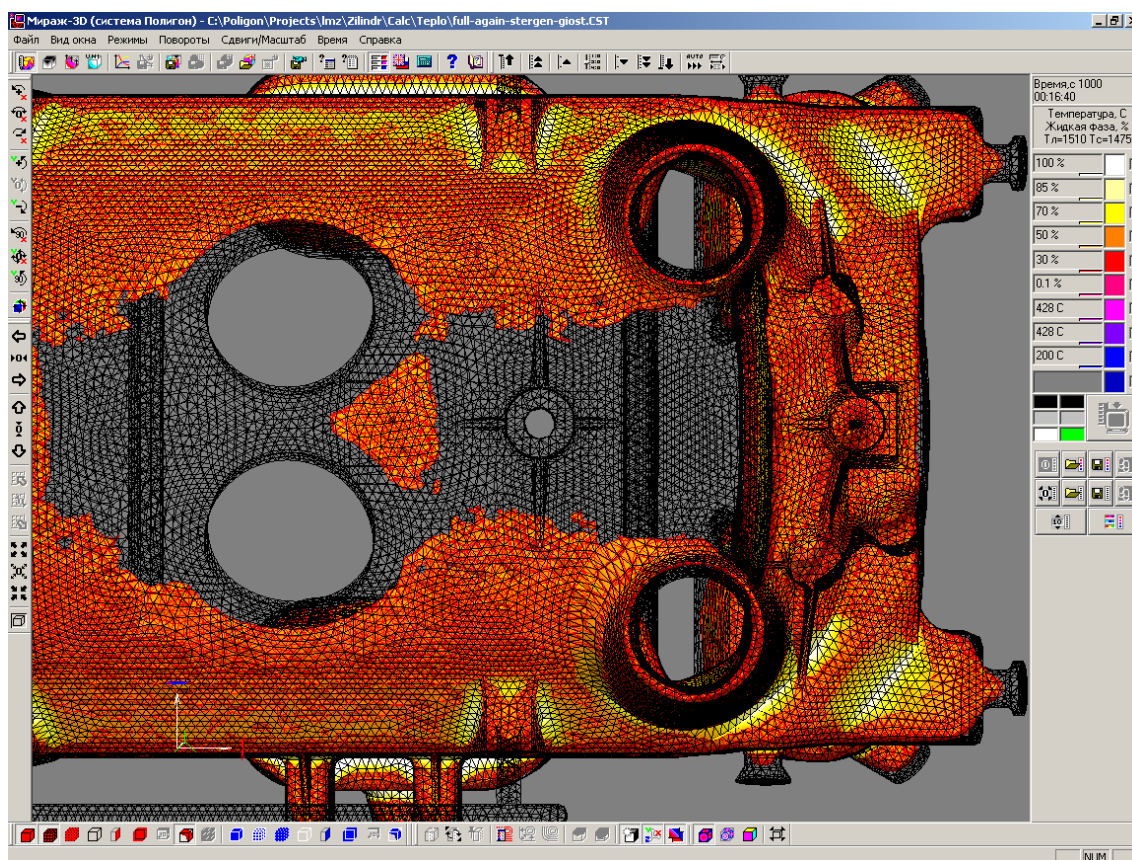
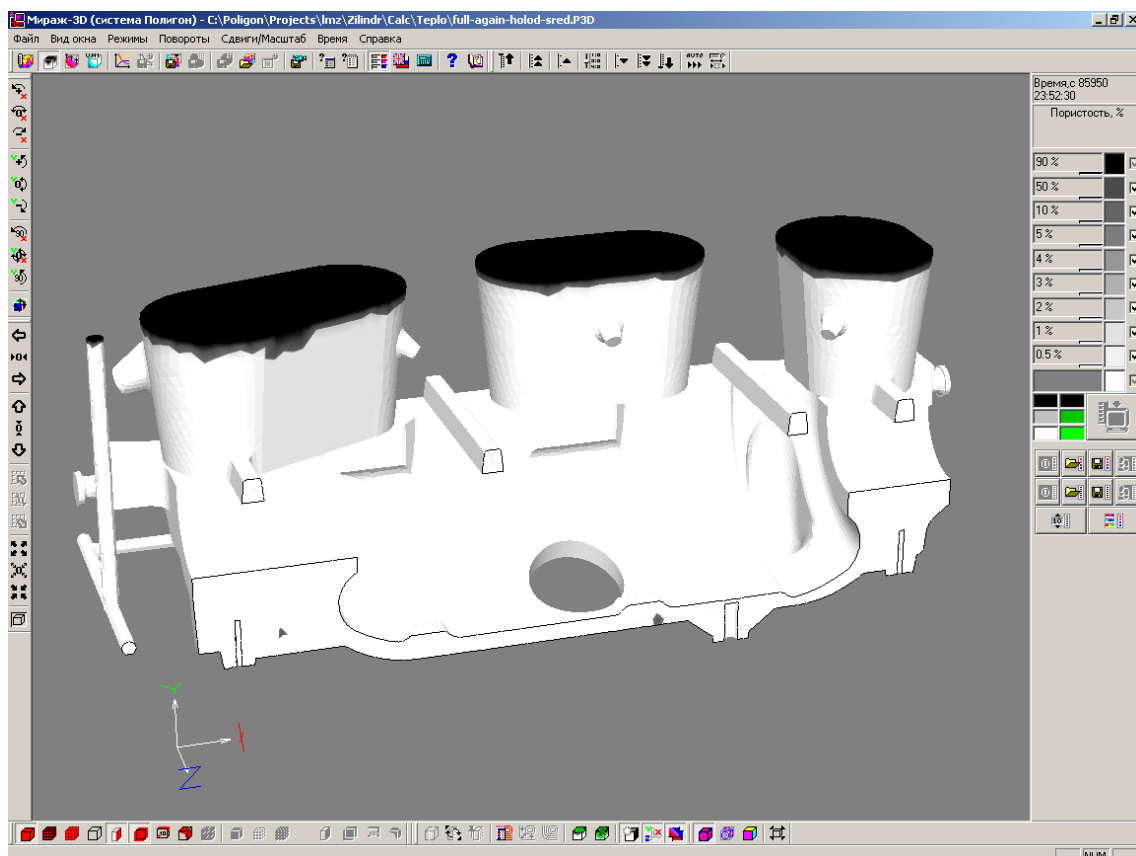


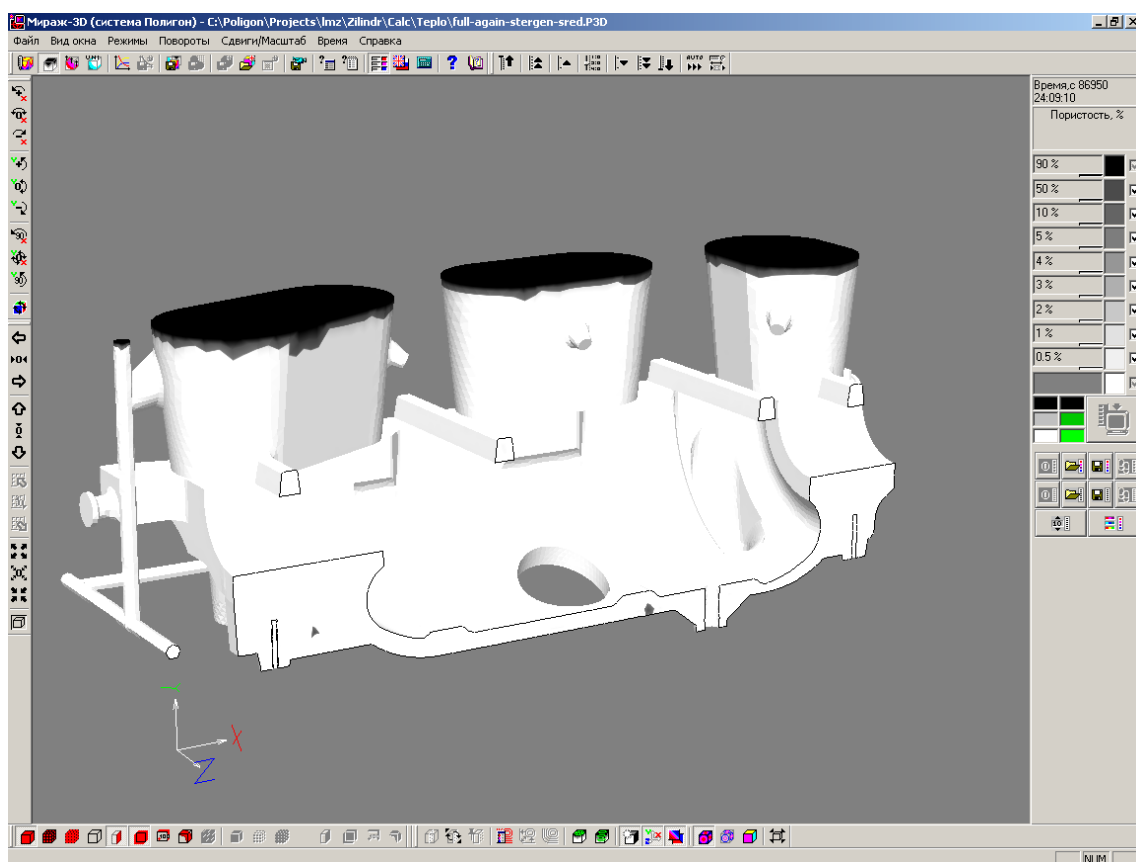
Рис. 2.10. Момент изоляции значительного объёма жидкости, применение хромитового стержня ( $P_1=0,50$ ,  $P_2=0,49$ ,  $P_3=0,48$ )

Результаты расчётов по новым технологиям со «средними» условиями по 3-м критическим точкам, определяющим усадку, даны на рис. 2.11 и 2.12 ( $P_1=0,5$ ,  $P_2=0,4$ ,  $P_3=0,3$ ). Анализ результатов показывает, что несомненно возникновение дефекта между внутренним и внешним приливом на «спинке» по обеим новым технологиям. Рис. 2.13, аналогичный рис. 2.10, иллюстрирует процесс возникновения дефекта.





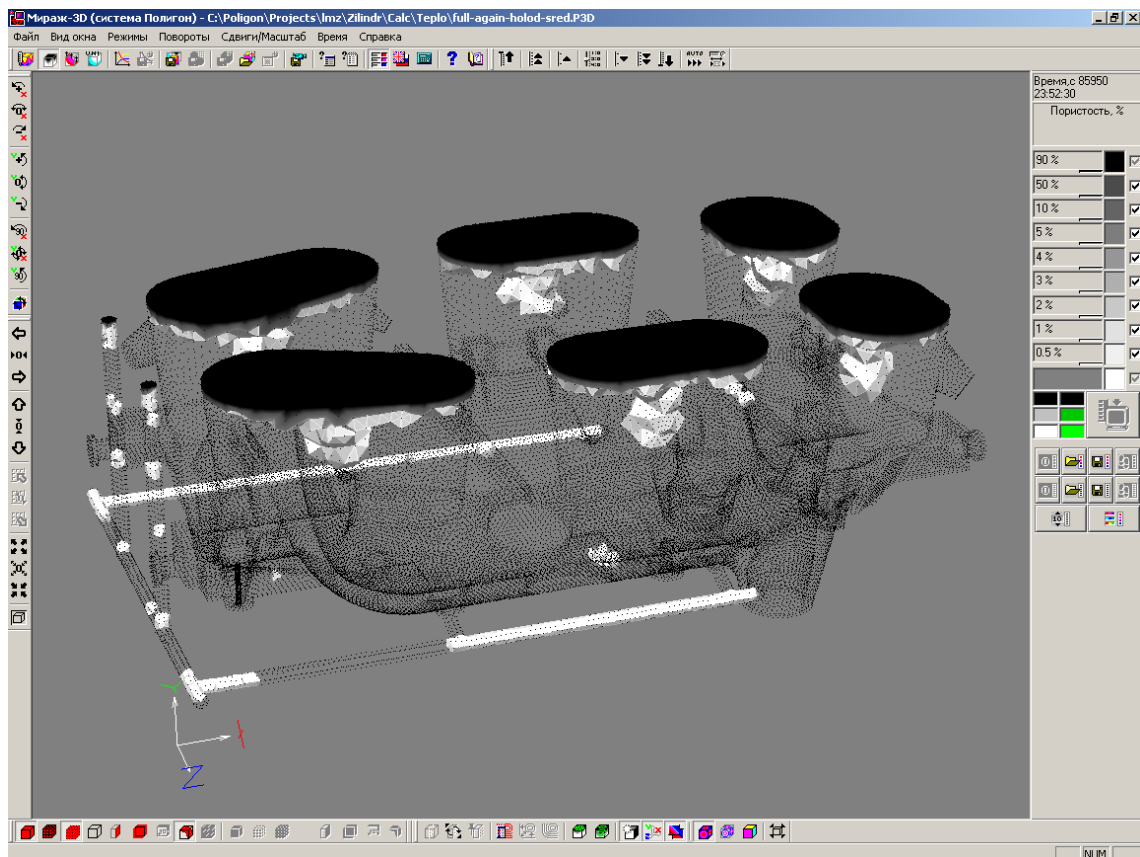
а



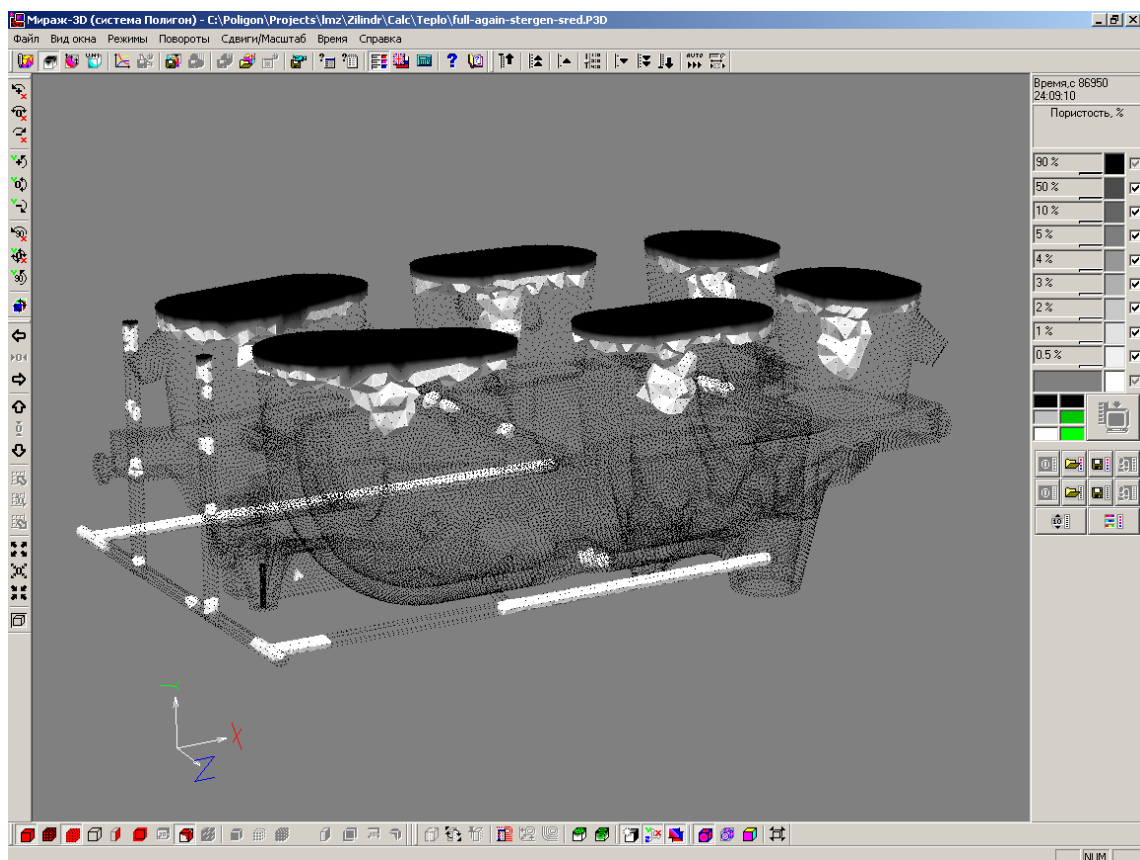
б

Рис. 2.11. Усадочные дефекты в отливке при применении изменённой технологии (сечение;  $P_1=0,5$ ,  $P_2=0,4$ ,  $P_3=0,3$ )  
а – увеличен холодильник;  
б – установлен хромитовый стержень





а



б

Рис. 2.12. Усадочные дефекты в отливке при применении изменённой технологии (пористость выше значения изоповерхности в 2%;  $P_1=0,5$ ,  $P_2=0,4$ ,  $P_3=0,3$ )

а – увеличен холодильник;

б – установлен хромитовый стержень



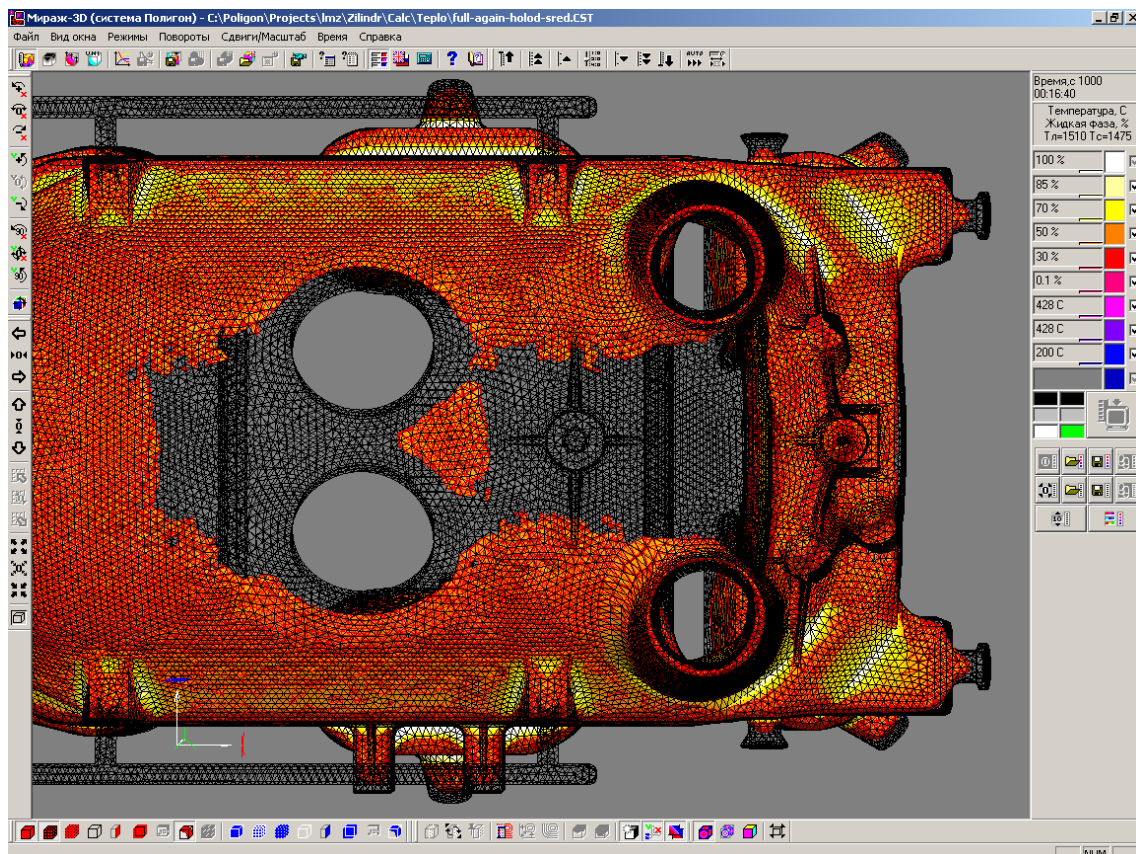


Рис. 2.13. Момент изоляции значительного объёма жидкости, применение увеличенного высверливаемого холодильника ( $P_1=0,5$ ,  $P_2=0,4$ ,  $P_3=0,3$ )

### 3. Выводы по результатам моделирования

1. Анализ результатов расчётов по первоначально предложенной технологии (рис. 2.2в) выявил неизбежное возникновение значительных рыхлот (пористость до 75%) в тепловых узлах, располагающихся в районе внешнего прилива на «спинке». Существует вероятность получения дефектов вдоль всей протяжённой части «спинки», имеющей одинаковую толщину, в результате чего осложнено выполнение условия её питания. В результате проведения моделирования были выявлены и эти «подозрительные» места. См. рис. 2.4 и 2.5.
2. Анализ результатов расчётов по изменённой технологии (рис. 2.7) показал, что от дефекта в районе внешнего прилива полностью избавиться не удаётся, хоть общее количество дефектных зон и несколько меньше. При благоприятном стечении обстоятельств дефект смещается в сторону (пористость до 55%, рис. 2.11 и 2.12). При заданных неблагоприятных условиях питания возможны дефекты и вдоль «спинки» (рис. 2.8, 2.9). При этом дефектная зона смещается из осевой части «спинки» к границе «спинки»-форма из-за наличия хромитовой облицовки стержня №2.