

УТВЕРЖДАЮ

04 июля 2005 г.

Технический отчёт

по договору _____

**«Компьютерное моделирование литейных процессов
для отливки»**

Заказчик: _____

Санкт-Петербург

2005

Аннотация

В отчете приведены результаты компьютерного моделирования средствами СКМ ЛП «Полигон» тепловых и усадочных процессов, происходящих при изготовлении методом литья под низким давлением диска автомобильного колеса из алюминиевого сплава марки А356.

При моделировании учитывались конструктивные и технологические (система охлаждения пресс-формы) особенности процесса литья

Исследовано распределение температурных полей в отливке и форме с момента первой заливки до установления стационарного теплового режима с представлением результатов в форме циклограмм. Выполнено моделирование затвердевания отливки в форме с распределением в них температур, определением времени затвердевания, а также показан процесс формирования усадочных дефектов в проблемных областях в местах перехода спиц к ободу.

Оценена эффективность дополнительного местного охлаждения проблемных зон отливки с помощью тепловых труб. Количественно определен тепловой поток от проблемных зон, который должен быть обеспечен тепловыми трубами. Исследованы процессы затвердевания и образования усадочных дефектов при дополнительном охлаждении проблемных зон тепловыми трубами. Показана достаточно высокая эффективность этого технического приема.

Исследован процесс литья диска автомобильного колеса в пресс-форме с графитовыми элементами, оформляющими наружную поверхность обода. Моделирование процессов затвердевания и усадки в комбинированной пресс-форме показало высокую эффективность использования графитовых элементов. Оценены напряжения, возникающие в процессе затвердевания на поверхности сопряжения графитовых элементов с отливкой.

Сформулированы рекомендации, направленные на совершенствование конструкции пресс-формы с целью устранения усадочных дефектов и сокращения цикла литья.

Ключевые слова: моделирование, компьютерное, алюминиевый, сплав, охлаждение, затвердевание, усадка, дефекты, теплоотвод, труба, графит, напряжения.

Оглавление

	Стр.
1. Введение	4
2. Цель работы.....	5
3. Исходные данные.....	5
4. Подготовительный этап.....	6
4.1. Создание геометрической модели, разбитой на конечные элементы, и подготовка ее к моделированию.....	6
4.2. Ввод исходных данных.....	6
5. Моделирование процесса при существующей технологии.....	8
5.1. Исследование тепловой работы системы отливка-форма.....	8
5.2. Моделирование формирования усадочных дефектов при существующей технологии.....	11
5.3. Резюме по разделу 5.....	11
6. Исследование процесса с дополнительным охлаждением тепловыми трубами.....	17
6.1. Резюме по разделу 6.....	18
7. Исследование процесса с графитовыми. элементами пресс-формы.....	21
7.1. Резюме по разделу 7.....	21
8. Выводы по отчету в целом.....	26
9. Рекомендации.....	27

1. Введение

Настоящая работа выполнена в соответствии с техническим заданием к договору № _____ года и посвящена исследованию средствами компьютерного моделирования процесса изготовления методом литья под низким давлением диска автомобильного колеса из алюминиевого сплава марки А356.

Для решения указанной проблемы в работе используется система компьютерного моделирования литейных процессов (СКМ ЛП) «Полигон».

СКМ ЛП «Полигон» самая распространенная в России специализированная компьютерная программа для литейного производства.

Основные особенности СКМ ЛП «Полигон», обеспечивающие популярность этой программы, следующие:

- метод моделирования – **метод конечных элементов** (позволяет построить точную геометрическую модель сложной поверхности сопряжения «отливка – форма»),
- учет спектра выделения теплоты кристаллизации в интервале «ликвидус-солидус»,
- количественный учет пятен плотного контакта при теплопередаче на границе «отливка-форма» (адекватный учет теплового потока на границе «отливка – форма»),
- оригинальные физические модели формирования макро- и микропористости,
- наличие обширной базы данных по теплофизическим свойствам сталей и сплавов российских марок,
- набор критериев для прогнозирования структуры и свойств отливок,
- прогноз образования кристаллизационных трещин,
- адаптация к условиям российских литейных цехов,
- квалифицированное сопровождение.

2. Цель работы

Цель работы – компьютерное моделирование процесса изготовления методом литья под низким давлением диска автомобильного колеса из алюминиевого сплава марки А356 и оценка возможности получения здоровой отливки при существующей технологии и с дополнительными средствами охлаждения пресс-формы – тепловыми трубами и графитовыми элементами.

Задачи в соответствии с Техническим заданием:

- исследовать циклический температурный режим работы пресс-формы;
- исследовать процесс затвердевания отливки;
- выявить места, в которых возможны усадочные дефекты;
- оценить влияние охлаждения проблемных зон отливки тепловыми трубами на формирование усадочных дефектов;
- оценить влияние графитовой вставки в пресс-форму на процесс формирования усадочных дефектов;
- сформулировать рекомендации, направленные на минимизацию усадочных дефектов и сокращение цикла изготовления одной отливки.

3. Исходные данные

3.1. Отливка изготавливается из алюминиевого сплава марки А356.

3.2. Способ литья – литье под низким давлением.

3.3. Температура металла при заливке 700-740°C (далее по тексту принималась температура металла при заливке 740°C; специальный расчет показал, что сколь либо существенного влияния на результаты моделирования изменение температуры заливки в интервале 700-740°C не оказывает).

3.4. При моделировании задавали следующие граничные условия:

- на границе нижней части пресс-формы с плитой печи теплоотвода нет;
- часть пресс-формы, оформляющая внутреннюю поверхность отливки, изолирована от свободного обтекания воздушной средой;
- боковые поверхности пресс-формы контактируют с воздухом (температура 20°C);
- система воздушного охлаждения (время включения и отключения, скорость и температура дутья) учтена заданием соответствующих граничных условий для поверхностей каналов охлаждения.

4. Подготовительный этап

4.1. Создание геометрической модели, разбитой на конечные элементы, и подготовка ее к моделированию

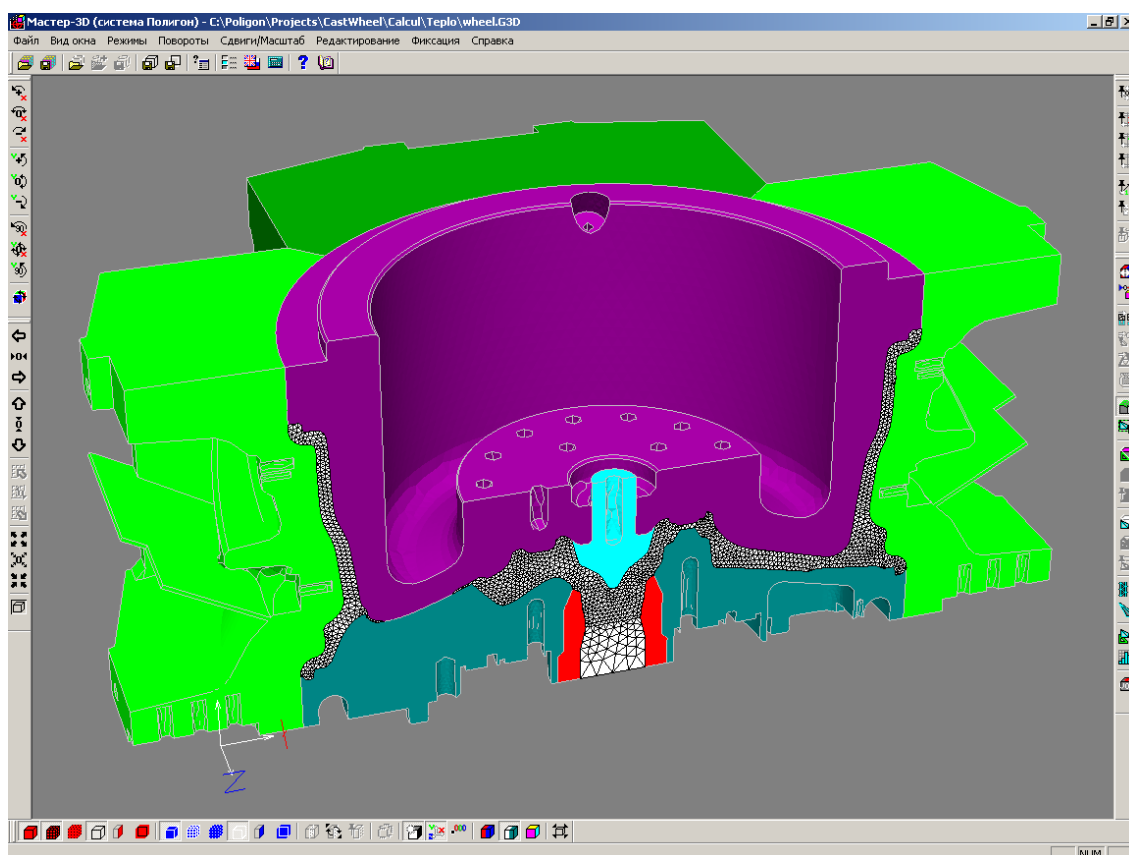
На первом этапе для имеющегося геометрического образа объекта моделирования (модель отливки и частей пресс-формы, построенная в CAD-системе) была сгенерирована конечно-элементная (КЭ) сетка в объёме отливки и во всех объёмах формы. Полученная КЭ-сетка была импортирована в систему компьютерного моделирования литейных процессов «Полигон». В препроцессоре системы «Полигон» импортированную сетку редактировали – модель ориентировали в пространстве относительно вектора силы тяжести, назначали индексы границ и объёмов, производили диагностику качества сетки, её автоматическую оптимизацию и правку. Подготовленную конечно-элементную сетку затем передавали в расчётные модули – собственно процессор системы «Полигон». Полученные расчётные геометрические модели представлены на рис. 1.

4.2. Ввод исходных данных

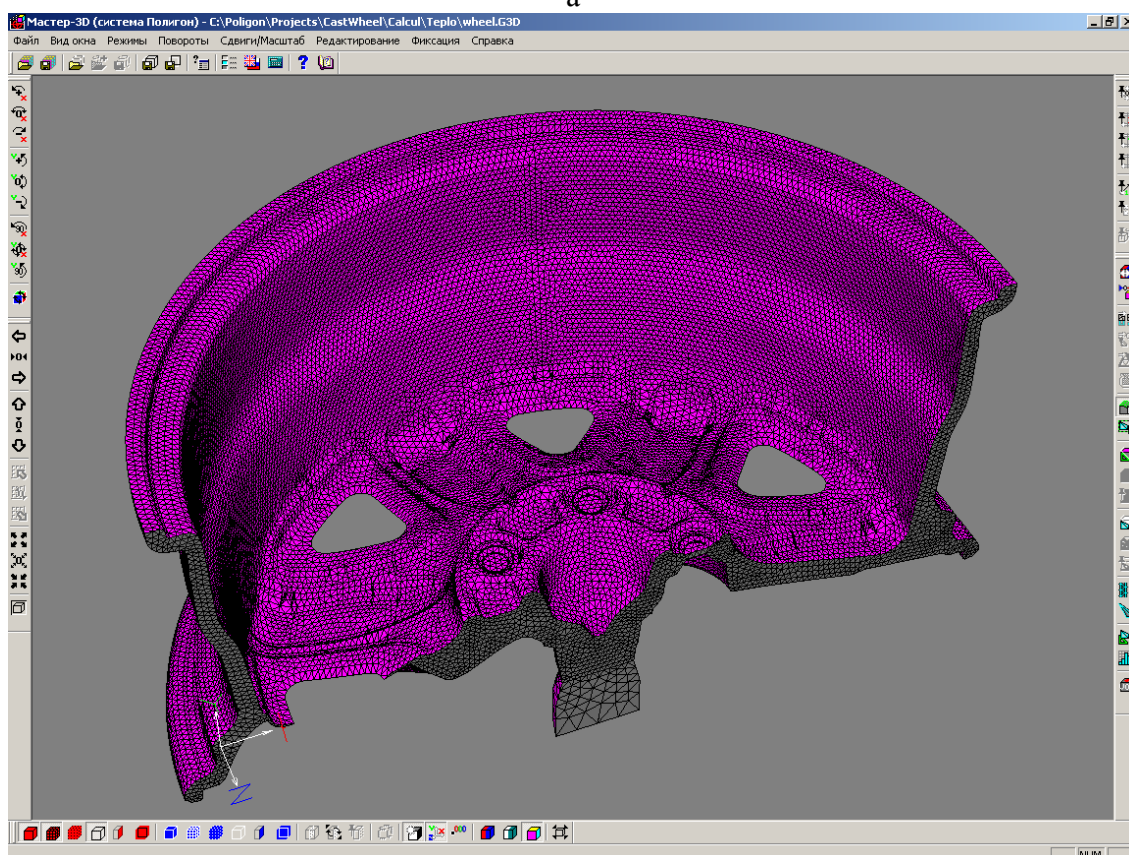
Следующий этап – задание теплофизических свойств материалов отливки и формы, а также усадочных свойств сплава. Теплофизические свойства сплава, равно как и усадочные свойства, были взяты из внутренней базы данных «Полигона» и подключённой к пакету справочной системы. Теплофизические свойства материала частей пресс-формы частично предоставлены Заказчиком, частично – взяты из базы «Полигона».

Для экономии времени при циклических расчётах моделирование проводили на половине модели, рассечённой по плоскости симметрии. «Полигон» располагает инструментами, позволяющими правильно производить такие экономичные расчёты, при этом по границе симметрии (отсечения) назначается коэффициент теплоотдачи равный нулю.

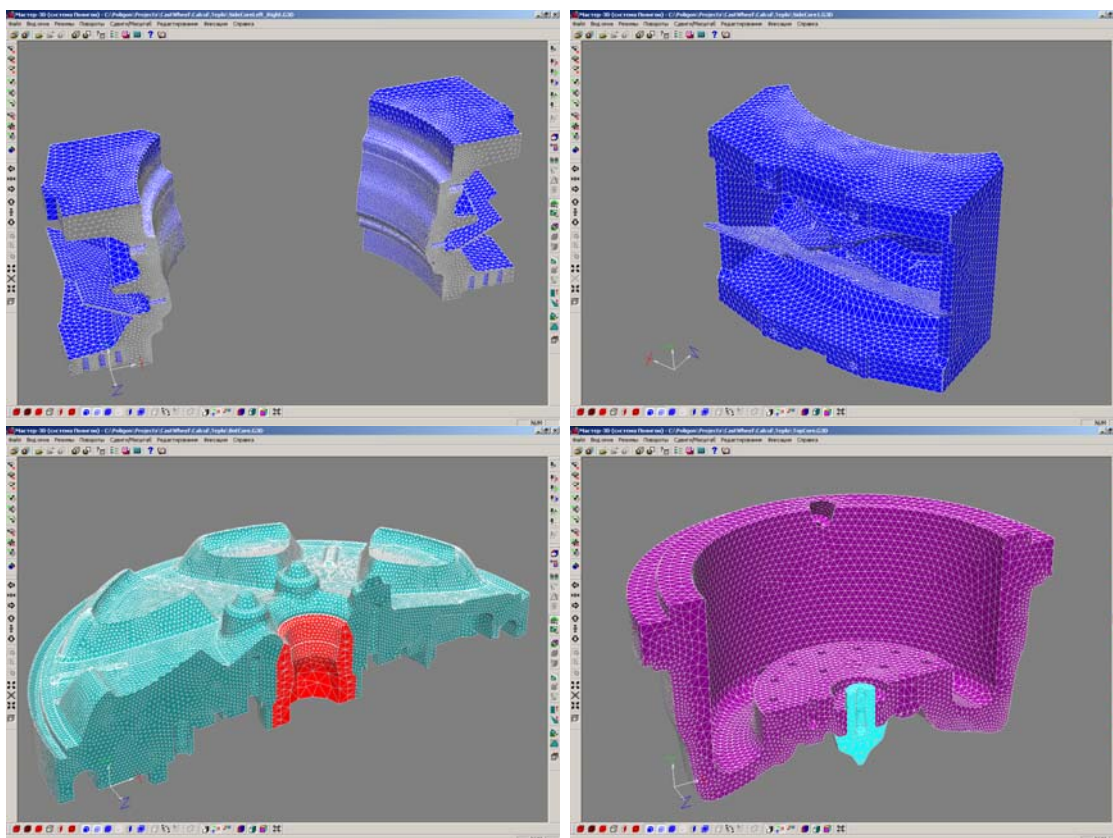
Различные части отливки окрашиваются в разные цвета, согласно принятой шкале температур и присвоенных различным температурам цветов, которые соответствуют определённым значениям температуры в тех или иных местах отливки. Шкала на рисунках находится в правой части окна программы.



a



б



В

Рис. 1. Геометрические КЭ-модели

а – полная модель (показано характерное сечение);

б – модель отливки (форма скрыта);

в – модели различных частей пресс-формы.

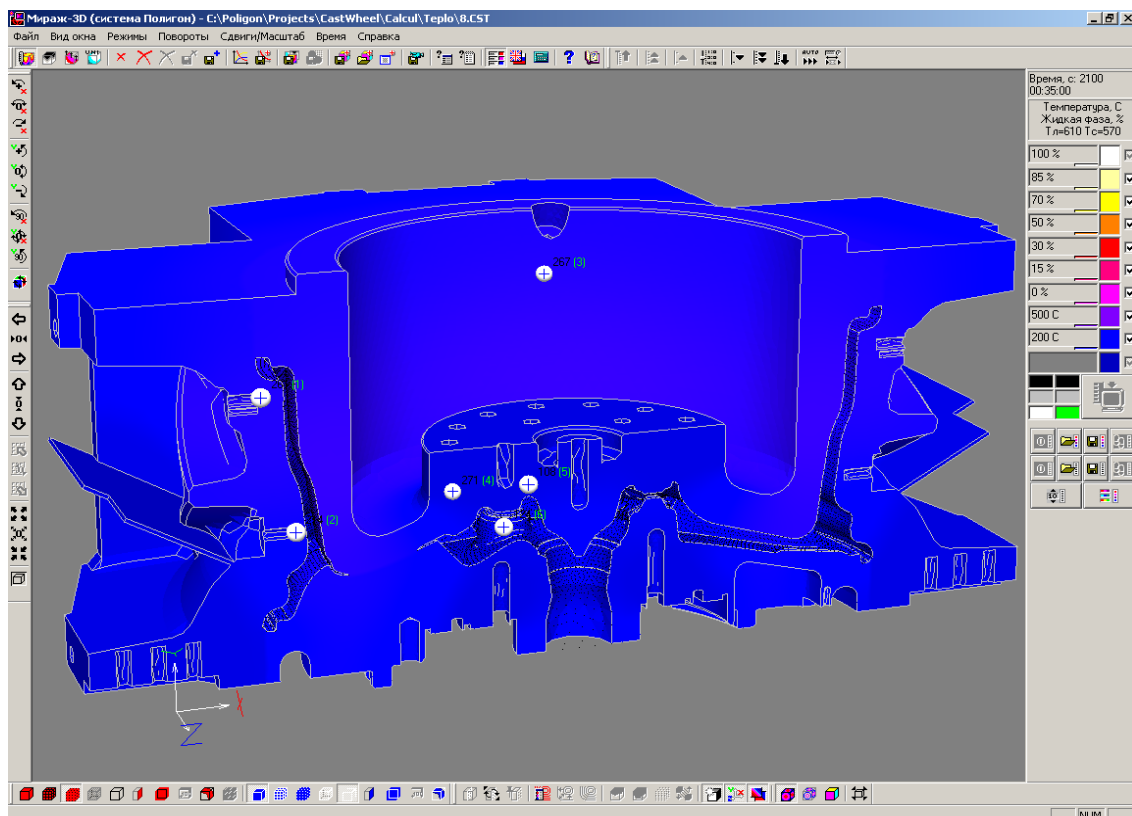
5. Моделирование процесса при существующей технологии

5.1. Исследование тепловой работы системы отливка-форма

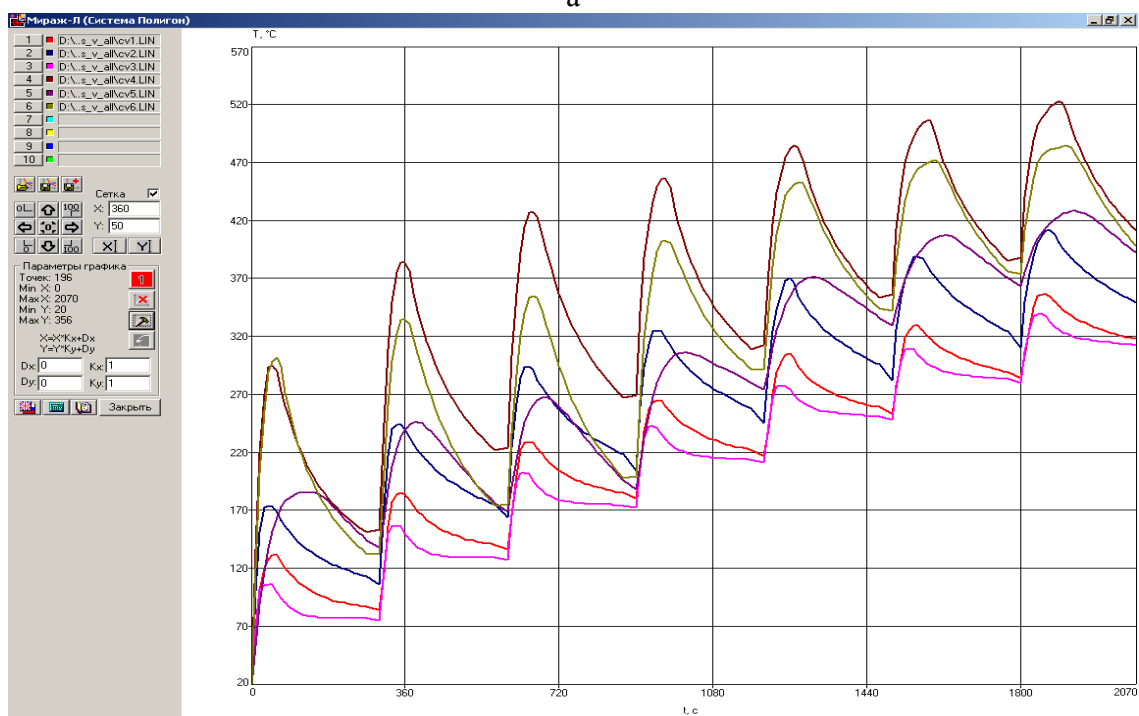
В результате моделирования температурного режима работы пресс-формы выявлено (рис. 2), что выход на установившийся режим различных частей формы происходит преимущественно на 6-ом – 8-ом цикле. Различия в температурах на этих циклах уже не значительны.

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.

Температурная амплитуда несколько отличается от представленных Заказчиком измеренных термопарой значений. Объясняется различие тем, что при моделировании точка измерения находится полностью в объеме металла пресс-формы, в то время как при измерении термопарой на ее показания оказывает влияние наличие отверстия под термопару.

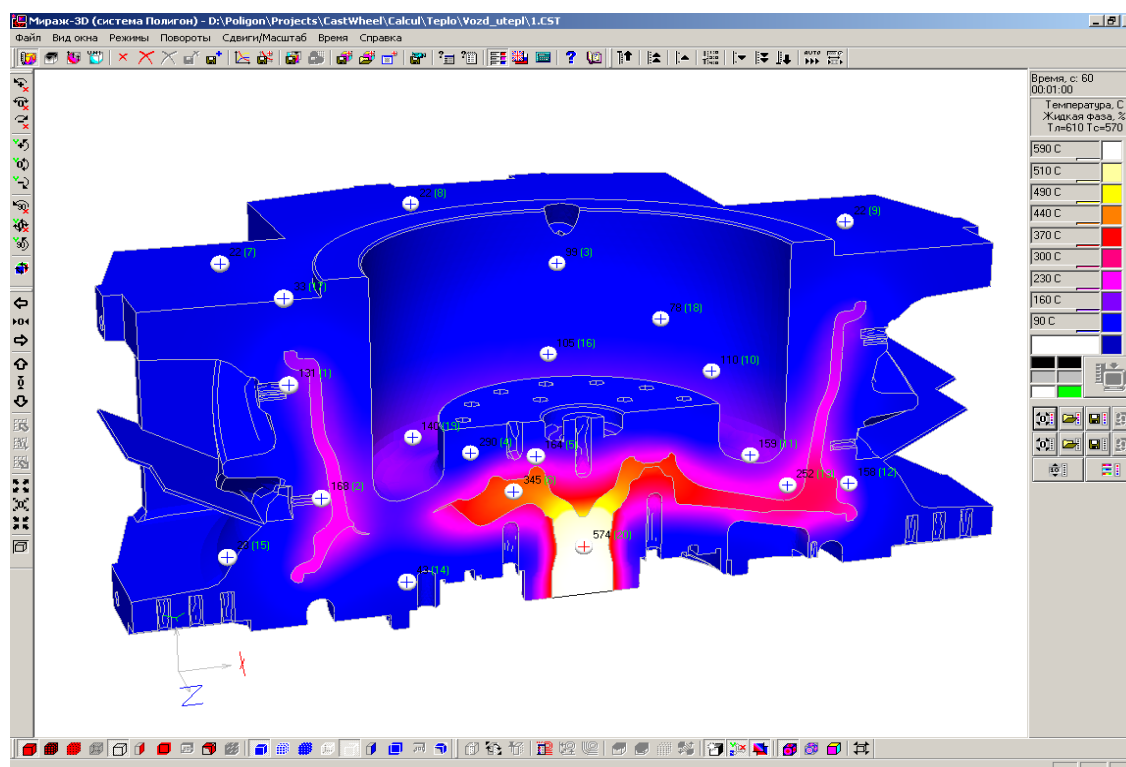


а

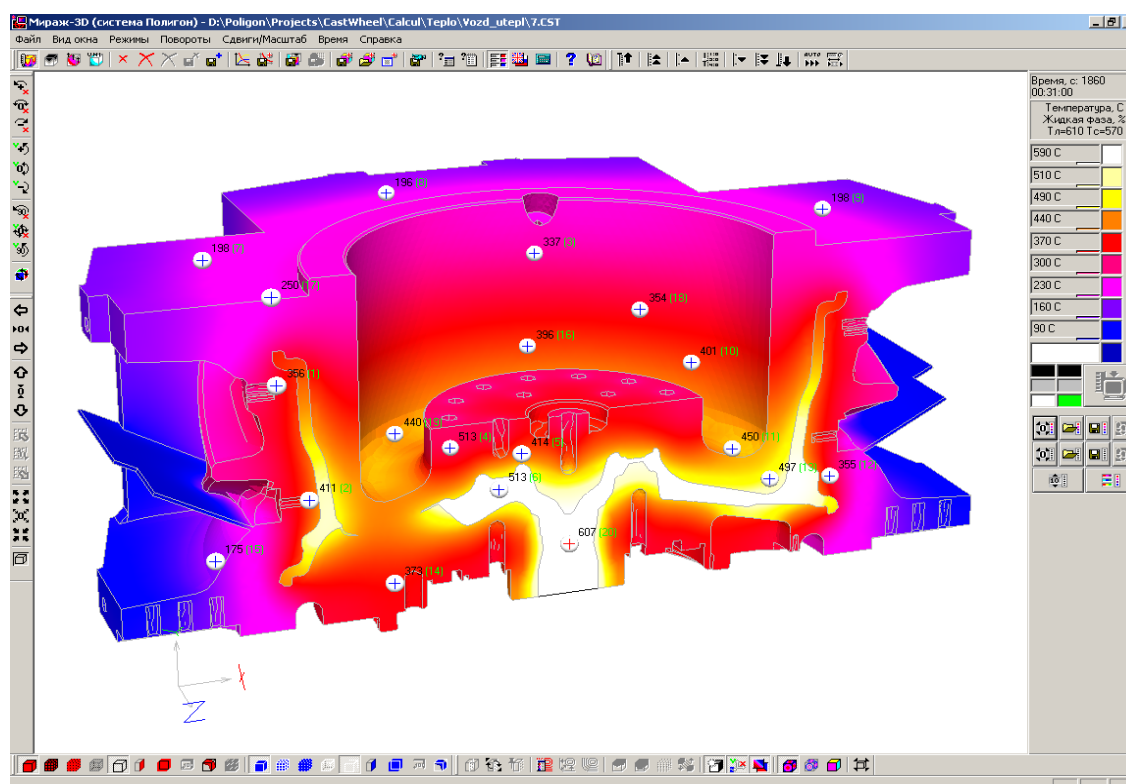


б

Рис. 2. Циклограмма работы пресс-формы
 а – расположение точек, для которых снимались термические кривые
 на полной расчётной модели пресс-формы;
 б – циклограммы, снятые для оговоренных точек.



а



б

Рис. 3. Фрагменты результатов теплового расчёта, поля температур в отливке и форме
а – на 60-й с. от старта 1-го цикла;
б – на 60-й с. от старта 7-го цикла

На 1-ой заливке (рис. 3а) отливка полностью затвердевает уже на 80-й секунде. Время, до которого рекомендуется поддерживать давление подпрессовки в металлопроводе на 1-ой заливке, составляет около 60 с.

После выхода на режим (рис. 3б) в форме постоянно поддерживается высокая температура, затвердевание отливки длится вплоть до момента раскрытия пресс-формы (240 с после окончания заполнения), а в металлопроводе остаётся жидкий металл.

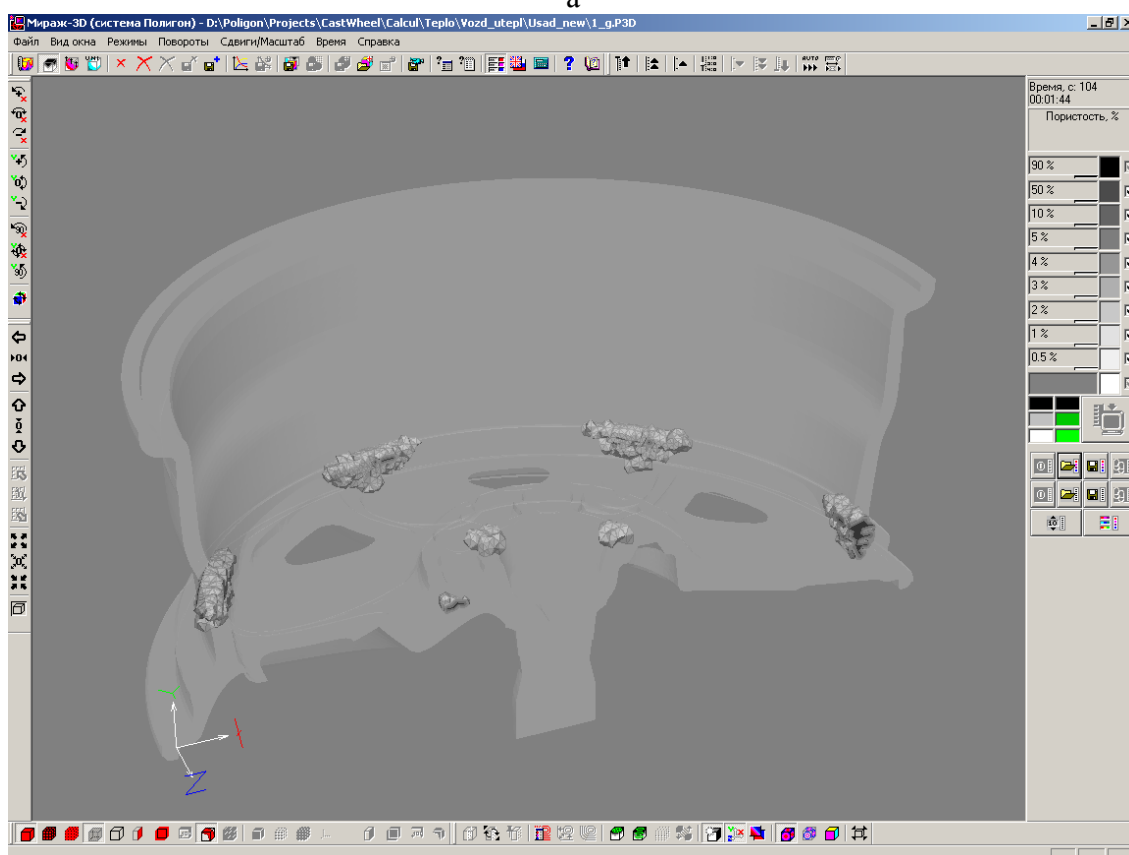
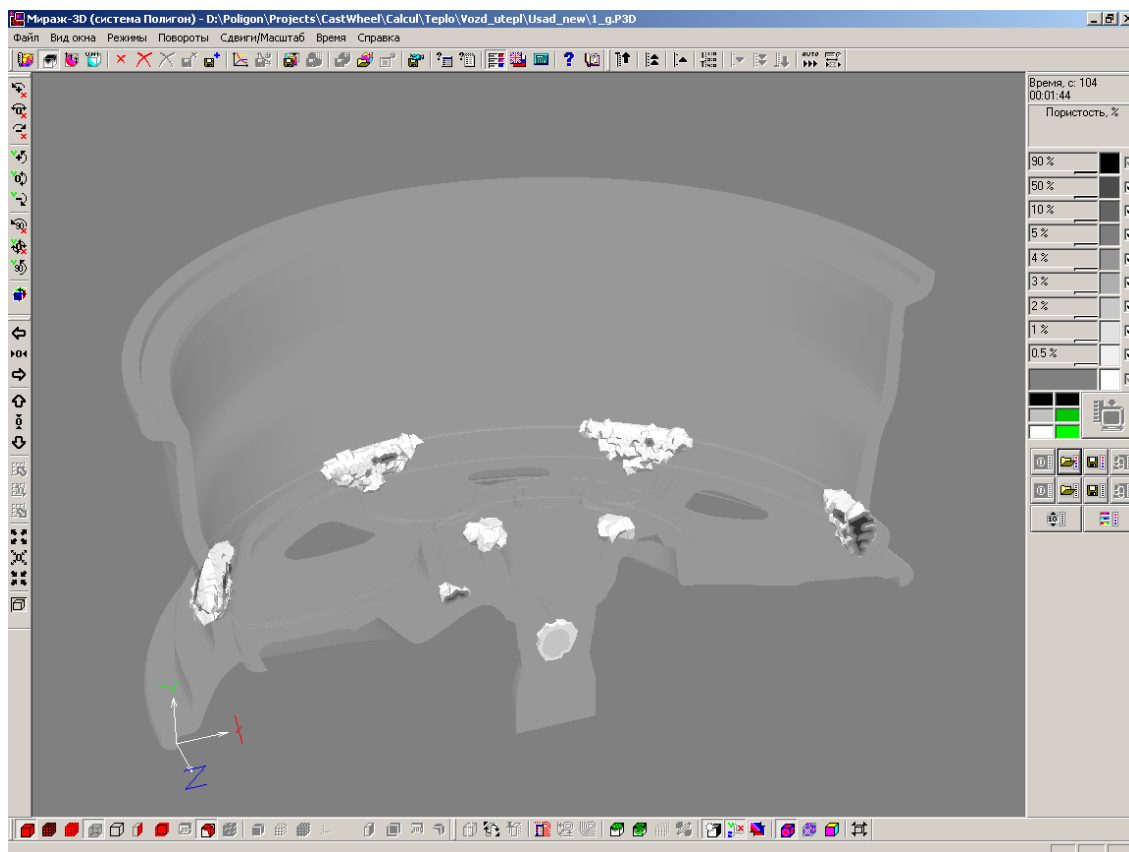
5.2. Моделирование формирования усадочных дефектов при существующей технологии.

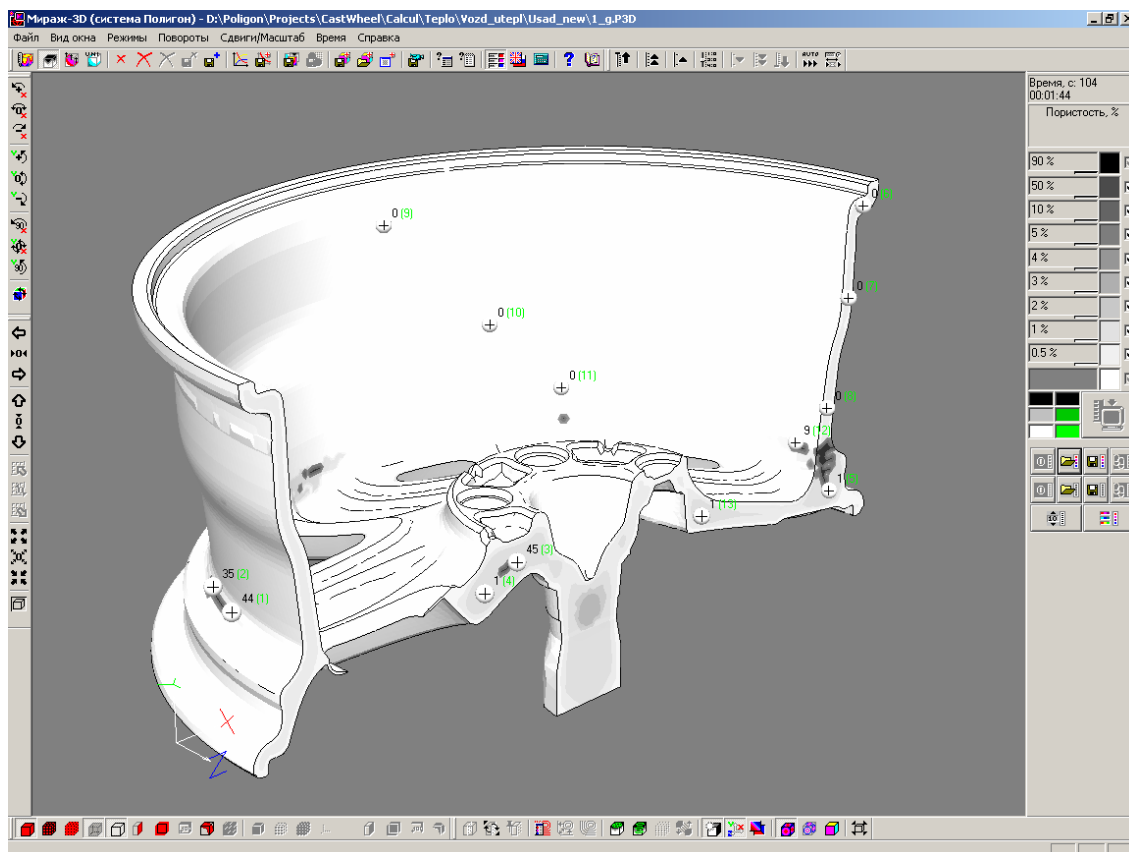
На первой заливке значительная часть отливки поражена пористостью (рис. 4). Дефекты в массивной части присоединения спиц к ободу выходят на внутреннюю и внешнюю (обрабатываемую) поверхности (рис. 4, в). Дефекты имеются также и в массивной части отливки, расположенной непосредственно над металлопроводом, поскольку он перемерзает и перестаёт питать эти зоны на ранних стадиях.

В отливках, получаемых на стационарном режиме, размер поражённых пористостью участков и процент пористости в указанных выше проблемных зонах значительно ниже (рис. 5). Наличие свободной поверхности – зеркал жидкого металла, возникающих на 55 с от начала затвердевания в зоне присоединения спиц (рис 5, г) и перемещающихся в течение некоторого времени, свидетельствует о развитии макропористости порядка 10%, что подтверждает конечная картина по дефектам в отливке (рис. 5 а,б,в). Тонкая часть отливки (спица) перестаёт питать зону присоединения к ободу в тот момент, когда это массивное место ещё не затвердело (рис. 6 а). В местах присоединения спиц к ободу дефект отдалён от обрабатываемой поверхности на расстояние в среднем 3-4 мм. На внутренней поверхности обода дефект выходит на поверхность, сохраняется значительный процент пористости на поверхности. Этому способствует температурный режим пресс-формы: часть TopCore, формирующая проблемный участок поверхности отливки, значительно прогревается в процессе формирования отливки (рис. 6 б).

5.3 Резюме по разделу 5

При действующей технологии система форма-отливка выходит на стационарный режим на 6-8 циклах. При этом 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. Дефекты в виде усадочной рыхлоты образуются в зоне соединения спицы с ободом.





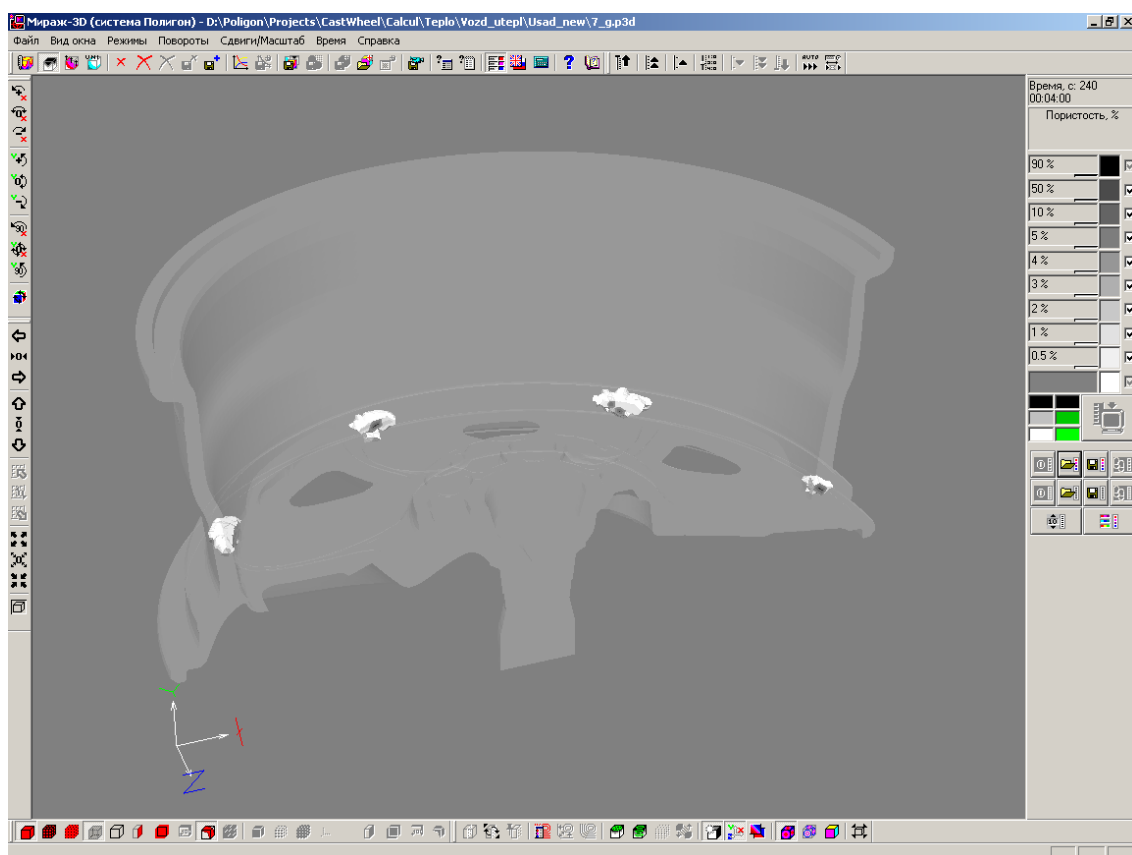
В

Рис. 4. Дефекты на 1-ом цикле

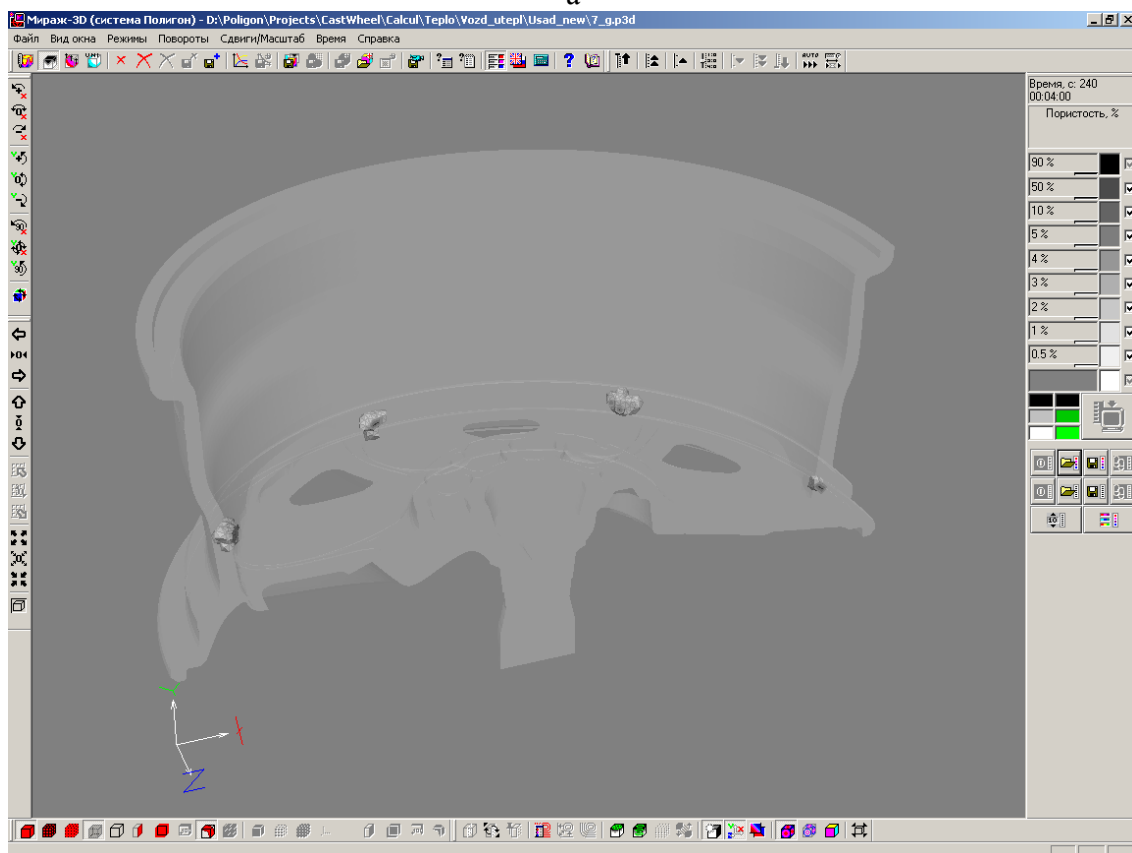
а – зоны в теле отливки, в которых пористость выше 2%;

б – зоны с пористостью выше 10%;

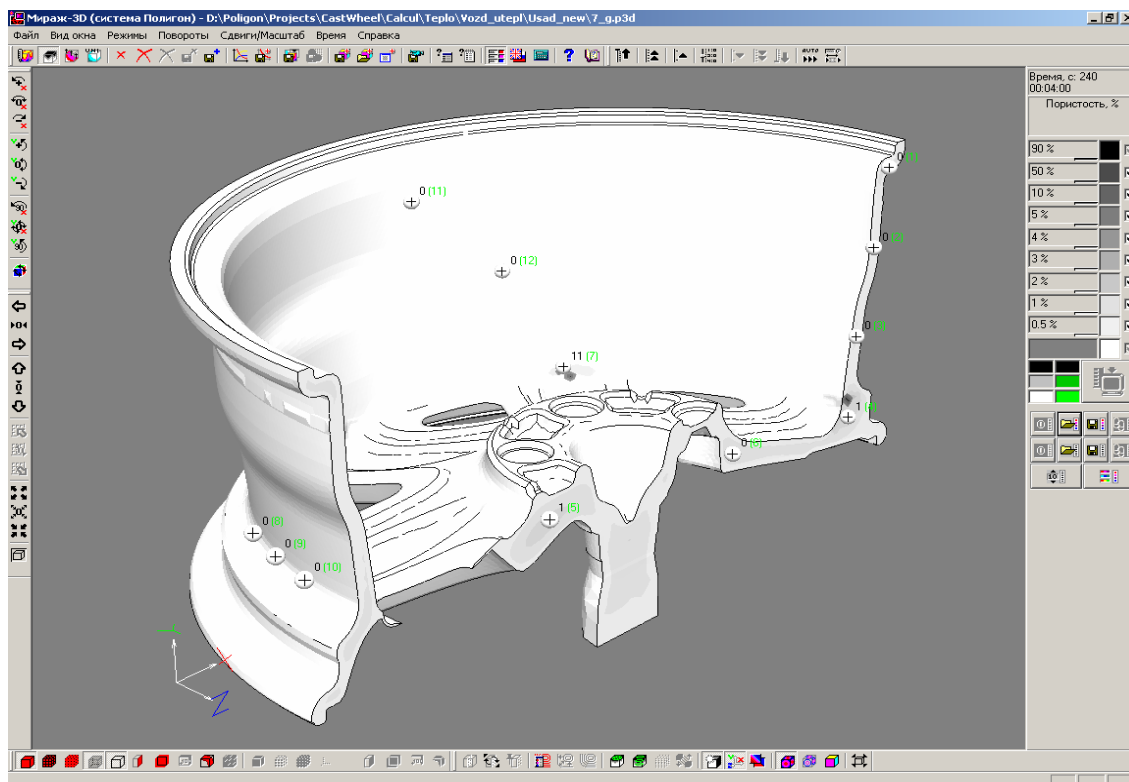
в – дефекты на поверхности и в сечении



а



б



В

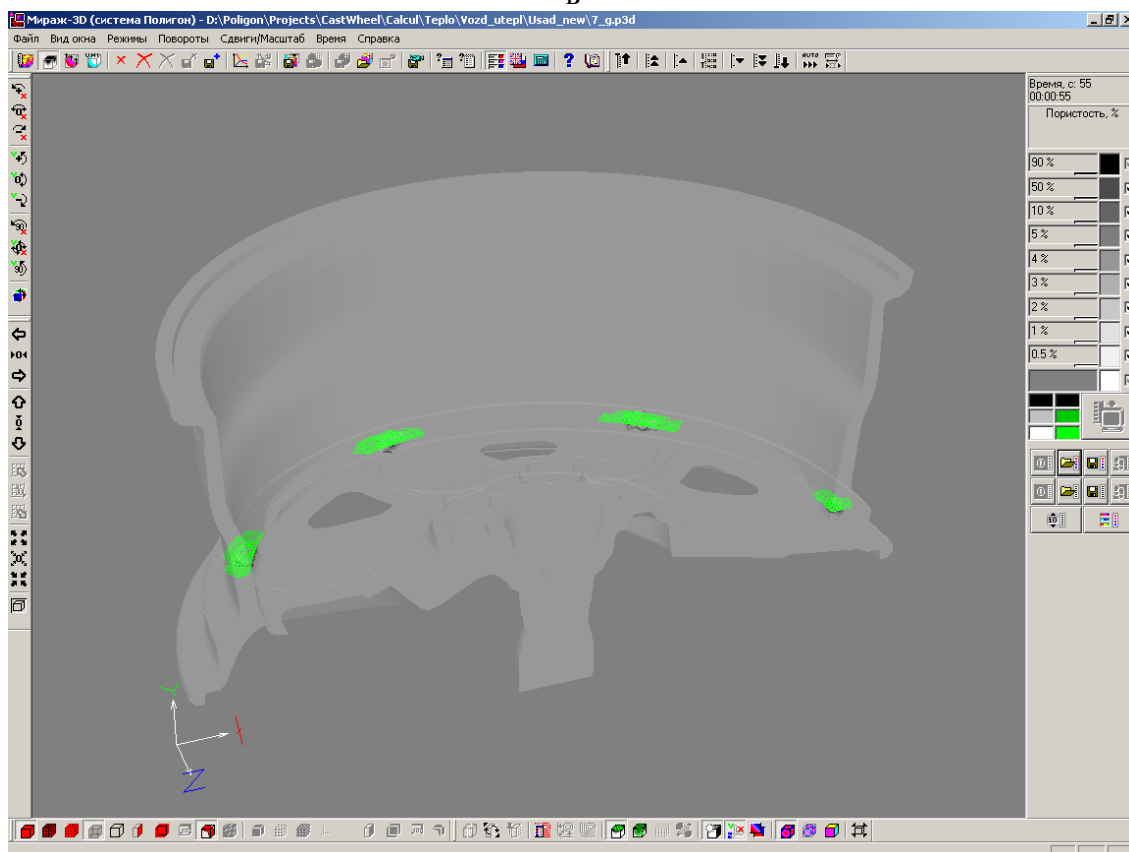
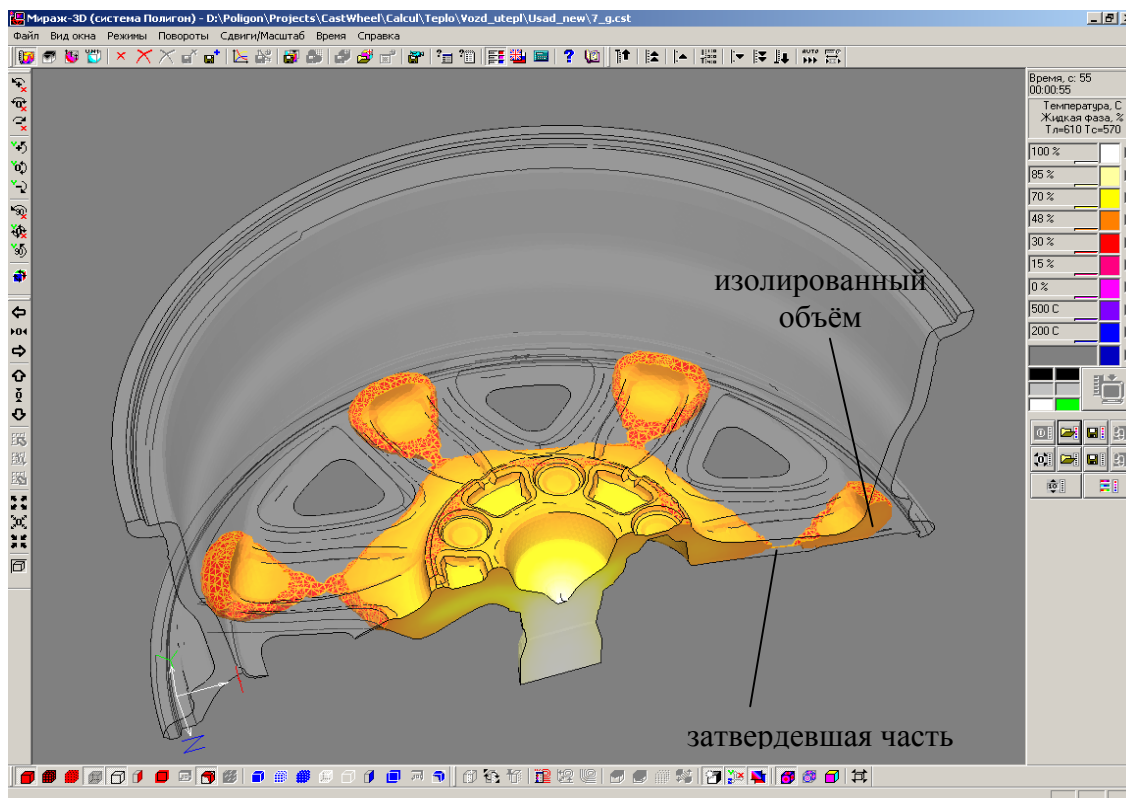
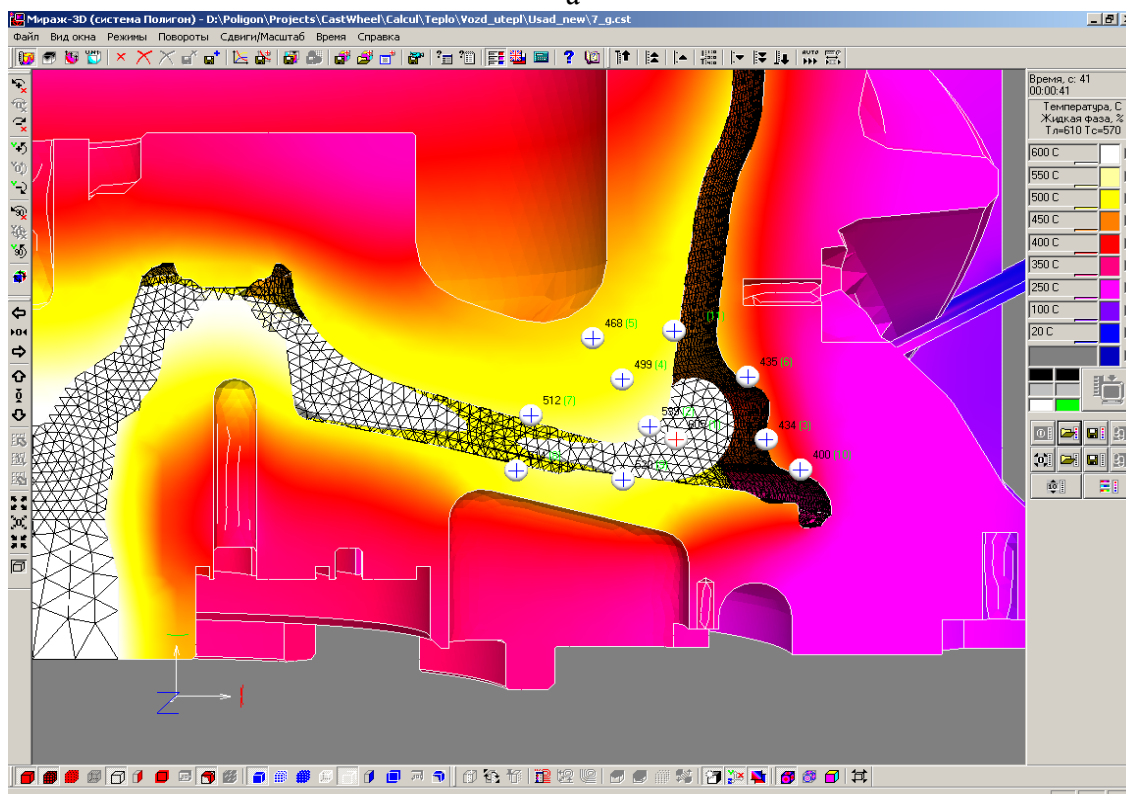


Рис. 5. Пористость в отливке на 7-ом цикле
 а – зоны с пористостью выше 2%; б – зоны с пористостью выше 10%;
 в – дефекты на поверхности и в сечении; г – все зеркала жидкого
 металла в отливке на 55 с.



а



б

Рис. 6. Причины возникновения усадки
а – локализация участка жидкой фазы, оторванного от питания;
б – местный разогрев TopCore вблизи массивной части

6. Исследование процесса с дополнительным охлаждением тепловыми трубами

Заказчиком предложено исследовать процесс изготовления отливки с организацией дополнительного теплоотвода от выявленных в разделе 5 проблемных зон посредством установки в пресс-форму тепловых труб. Предложено устанавливать по две трубы к каждой проблемной зоне; диаметр труб 10 мм, расстояние от конца трубы до внутренней поверхности пресс-формы 8 мм, рабочее тело – вода. Геометрическая модель пресс-формы с тепловыми трубами приведена на рис. 7.

Общее количество тепла, которое необходимо отводить от проблемной зоны может быть приближённо рассчитано по следующей зависимости (охлаждением твёрдой корки пренебрегаем)

$$Q = V \cdot L \cdot \rho + c_p \cdot V \cdot \rho \cdot (t_L - t_S),$$

где: $V\rho=0,3$ кг – масса теплового узла;

$L=380$ кДж/кг – скрытая теплота затвердевания сплава;

$c_p=1,2$ кДж/кг·К – удельная теплоемкость сплава;

$t_L=610^\circ\text{C}$, $t_S=570^\circ\text{C}$ – температуры ликвидуса и солидуса, соответственно.

$$Q=114+14=128 \text{ кДж}$$

С условием того, что это количество тепла должно быть отведено от массивного участка до перемерзания питающего тонкого канала (спицы, которая питает узел в течение 54 с.), требуемый средний тепловой поток должен составить $q=2,4$ кВт.

Тепловой поток от поверхности контакта тепловой трубы с пресс-формой, рассчитанный при моделировании, составил

$$q=2,2 \text{ кВт}$$

и был практически постоянным в течение всего процесса затвердевания теплового узла. Таким образом, тепловая труба способна почти полностью скомпенсировать тепловыделение массивного узла.

Тепловые трубы оказывают существенное влияние на температурный режим в зоне теплового узла отливки (рис. 8 а). Температура пресс-формы в этой зоне уменьшается от $430-440^\circ\text{C}$ (рис. 6 б) до $120-170^\circ\text{C}$, что приводит к практически полному устранению усадочной рыхлоты, а микропористость не превышает 1,5% (рис. 9).

6.1. Резюме по разделу 6

Установка в пресс-форме в проблемных зонах тепловых труб дает возможность полностью устранить в них усадочную рыхлоту. Существенного сокращения литейного цикла при этом не наблюдается.

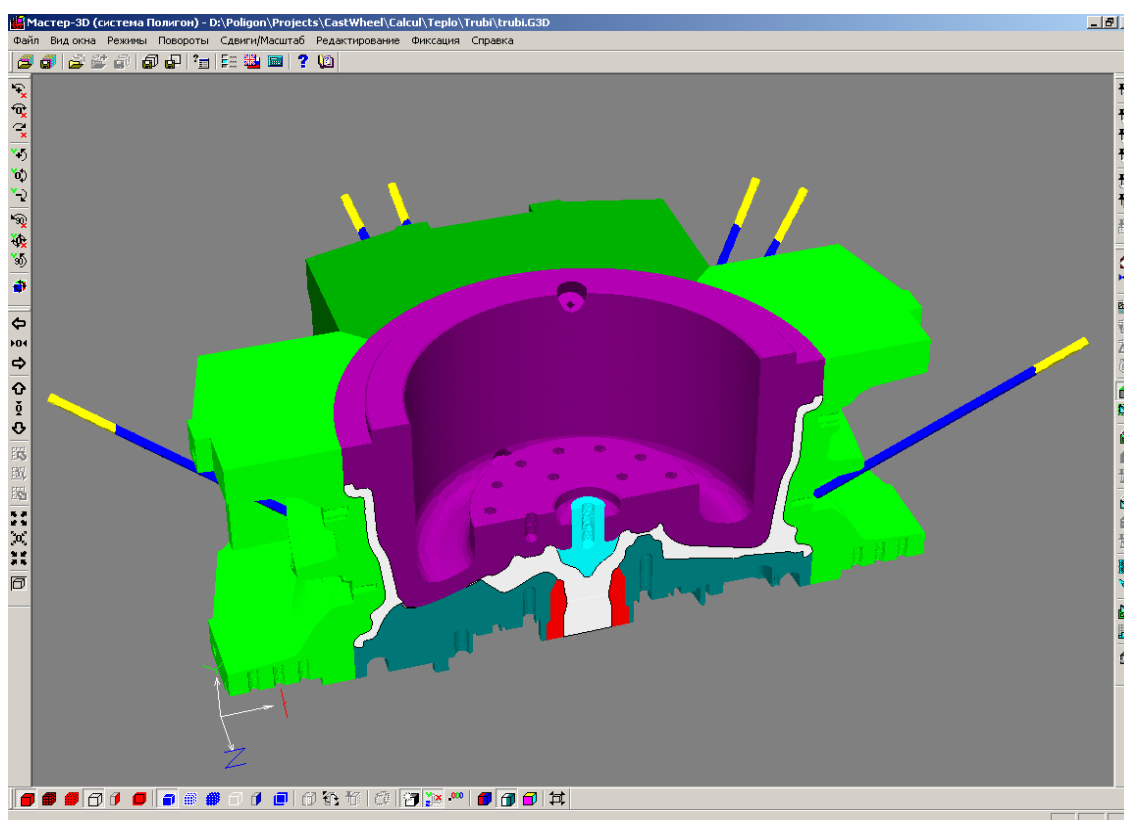


Рис. 7. КЭ-модель с тепловыми трубами $\varnothing 10\text{mm}$

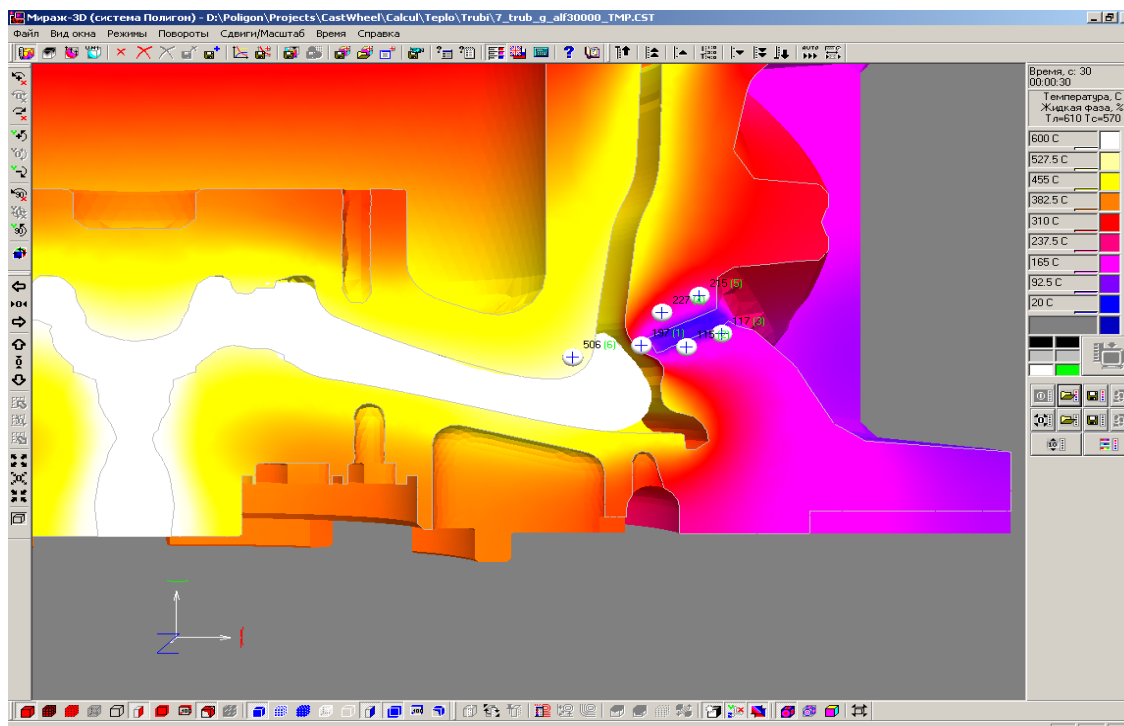
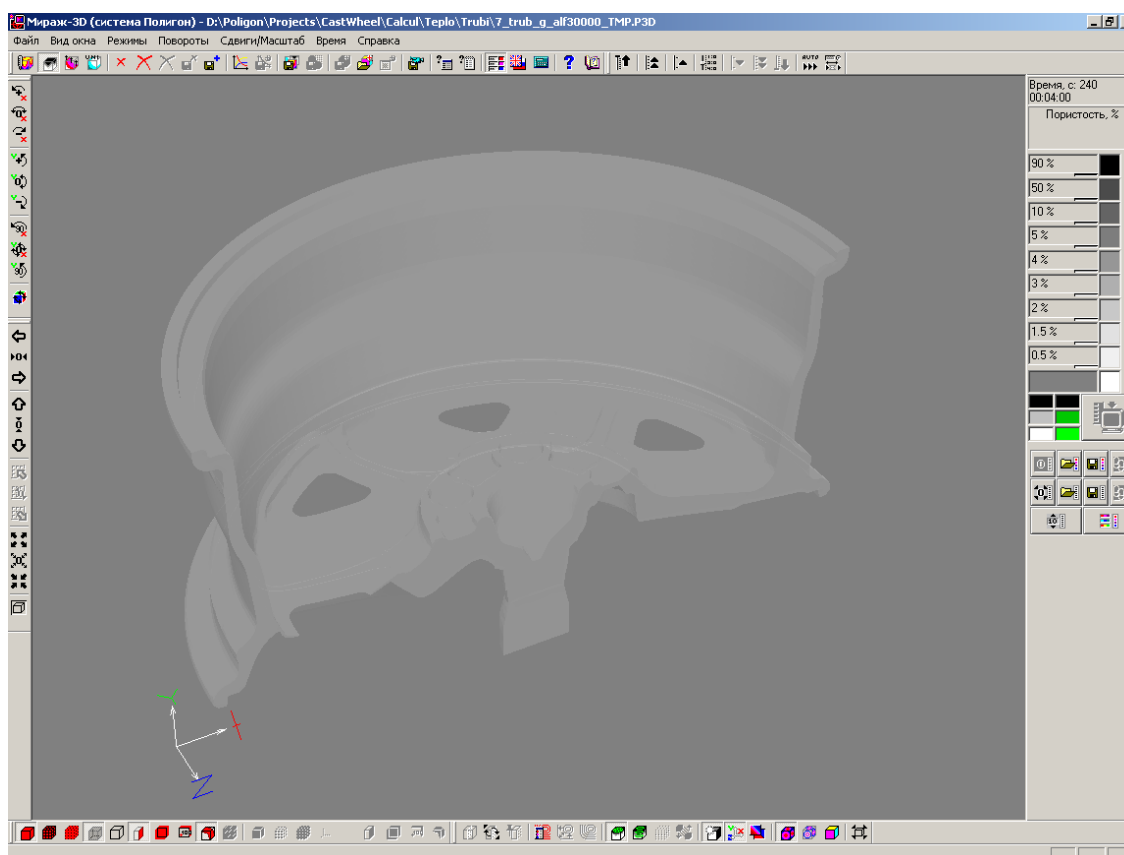
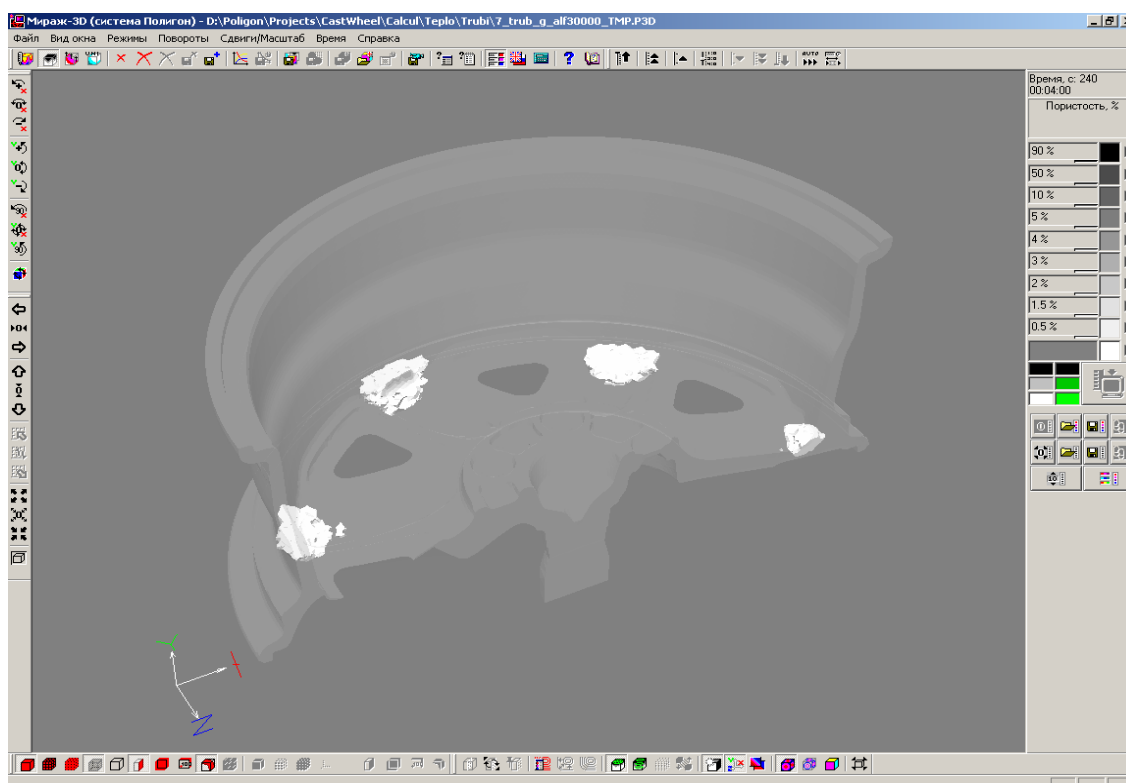


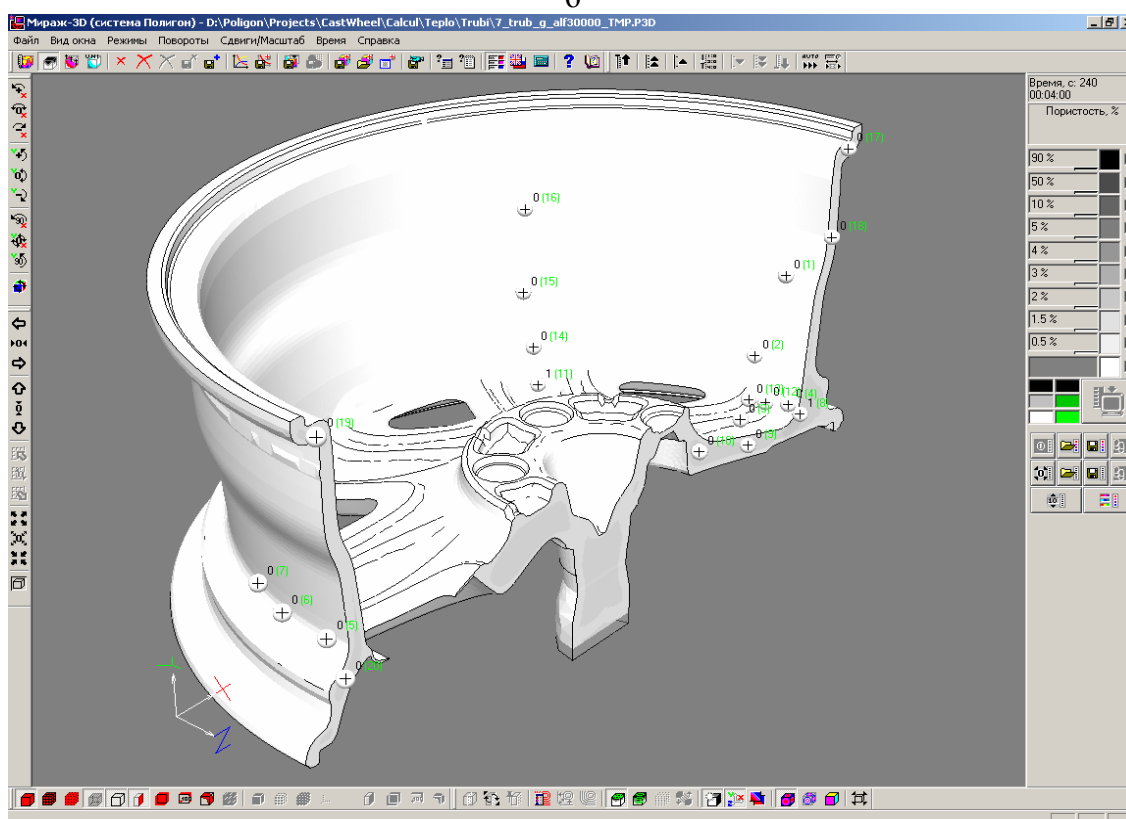
Рис. 8. Поле температур в зоне установки тепловой трубы:
температуры на 60 с. от начала цикла



а



б



в

Рис. 9. Усадочные дефекты в теле отливки при установке тепловых труб
 а – пористости выше 2% не обнаружена;
 б – пористость выше 1,5%;
 г – оценка дефектов на поверхности и в сечении

7. Исследование процесса с графитовыми элементами пресс-формы

Заказчиком было предложено выполнить моделирование процесса при изготовлении внутренней боковой поверхности пресс-формы из графита со следующими теплофизическими свойствами: средняя теплопроводность 140 Вт/м·К, объёмная теплоёмкость 27105 кДж/м³·К.

Геометрическая модель пресс-формы с графитовой вставкой приведена на рис. 10.

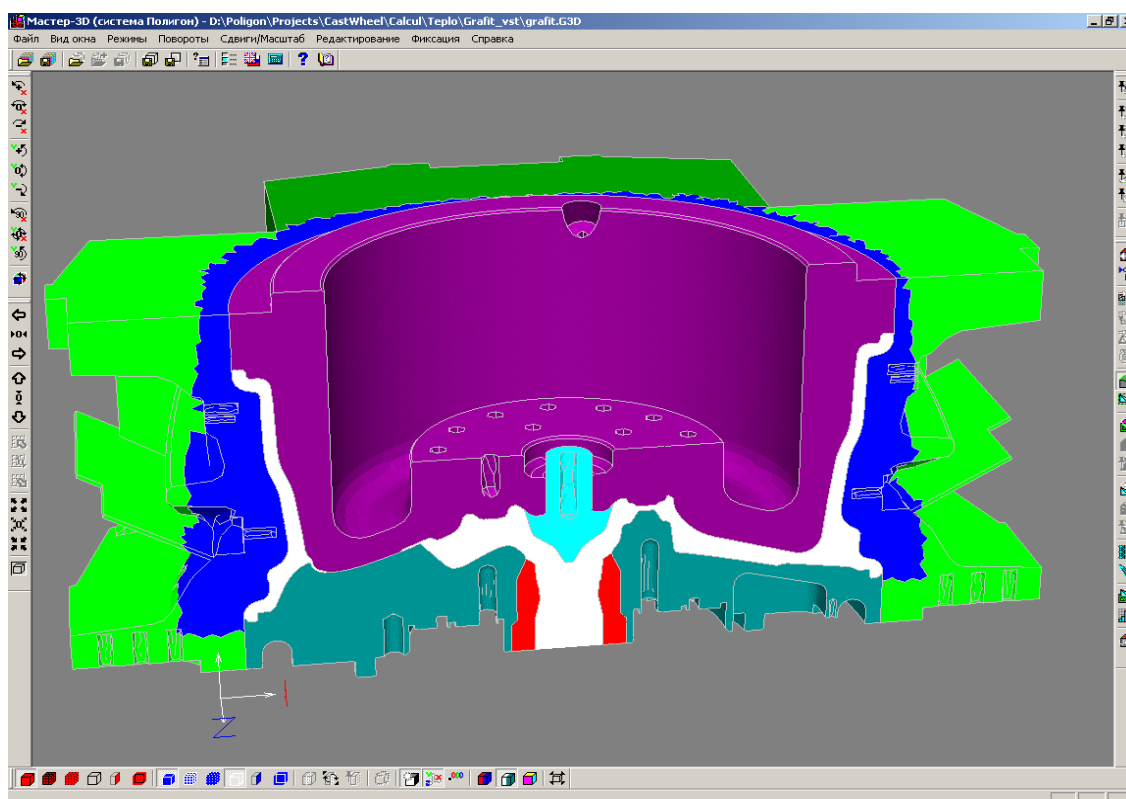
Применение графитовых вкладышей весьма эффективно для предотвращения дефектов в части присоединения спиц к ободу (рис. 11). Макропористость в указанных зонах не превышает 2%, тонкая часть (спица), затвердевает почти одновременно с питаемой ею массивной (рис. 12, а), количество жидкой фазы в момент отсечки от питания весьма мало. Температура на частях SideCore, формирующих внешнюю (обрабатываемую) поверхность зоны присоединения спиц к ободу (рис. 12, б), поддерживается на более низком уровне, нежели в случае отсутствия графитовых вкладышей (ср. рис. 6, б). Отмечается смещение теплового узла и, соответственно, зоны пористости в сторону спицы. На необрабатываемой внутренней поверхности соединения спицы с ободом наблюдается пористость до 1%.

Существенного сокращения литейного цикла при этом не наблюдается.

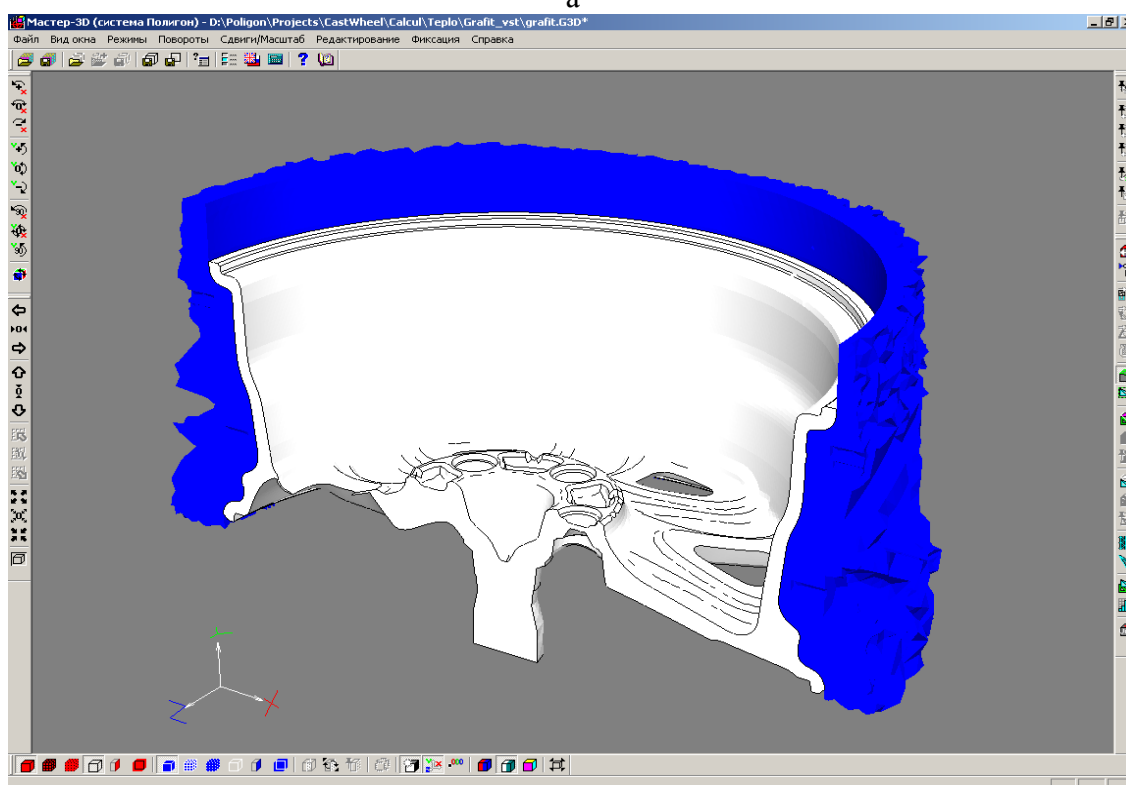
Термические напряжения в графитовой вставке не превышают 7-7,5 МПа (рис. 13).

7.1. Резюме по разделу 7

Выполнение формообразующих элементов внутренней боковой поверхности пресс-формы из графита является эффективным средством повышения качества отливки. При этом существенного сокращения литейного цикла не наблюдается, а термические напряжения в графитовой вставке не превышают 7-7,5 МПа.



а

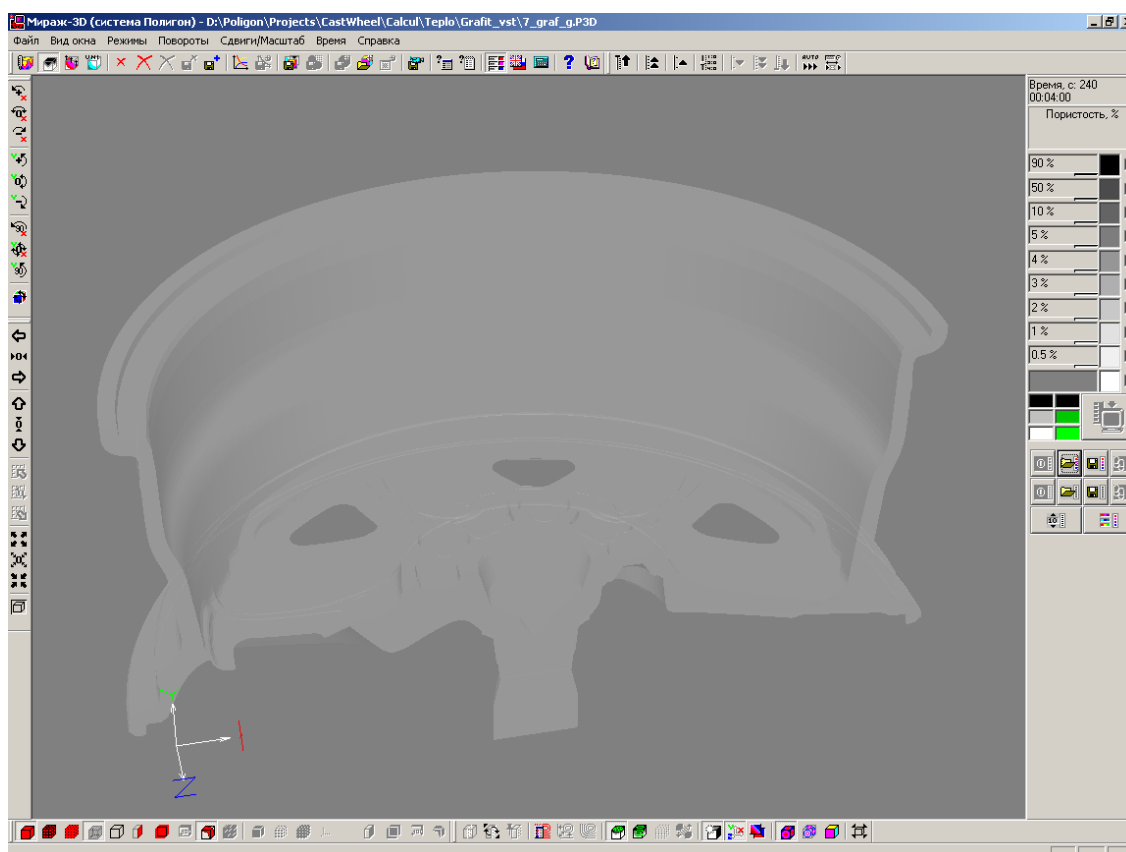


б

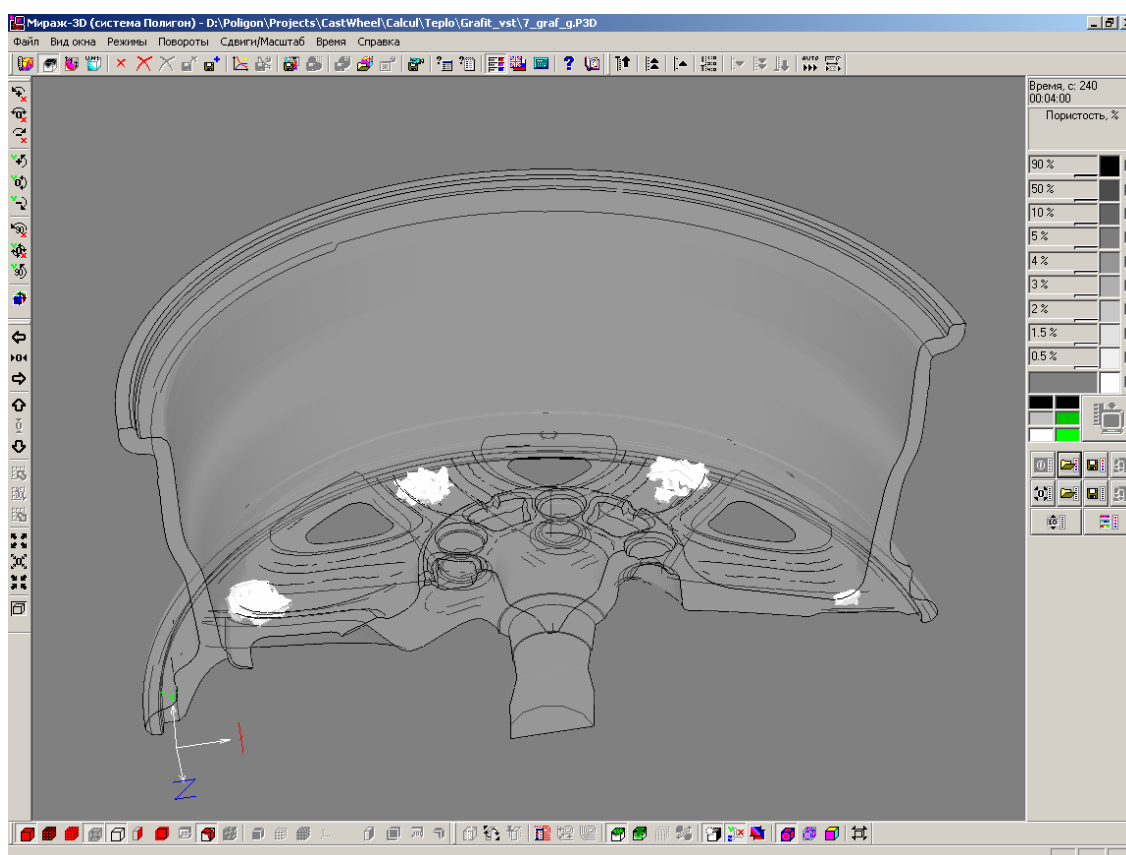
Рис. 10. КЭ-геометрия. Синим цветом показаны графитовые части пресс-формы

а – форма и отливка в сечении;

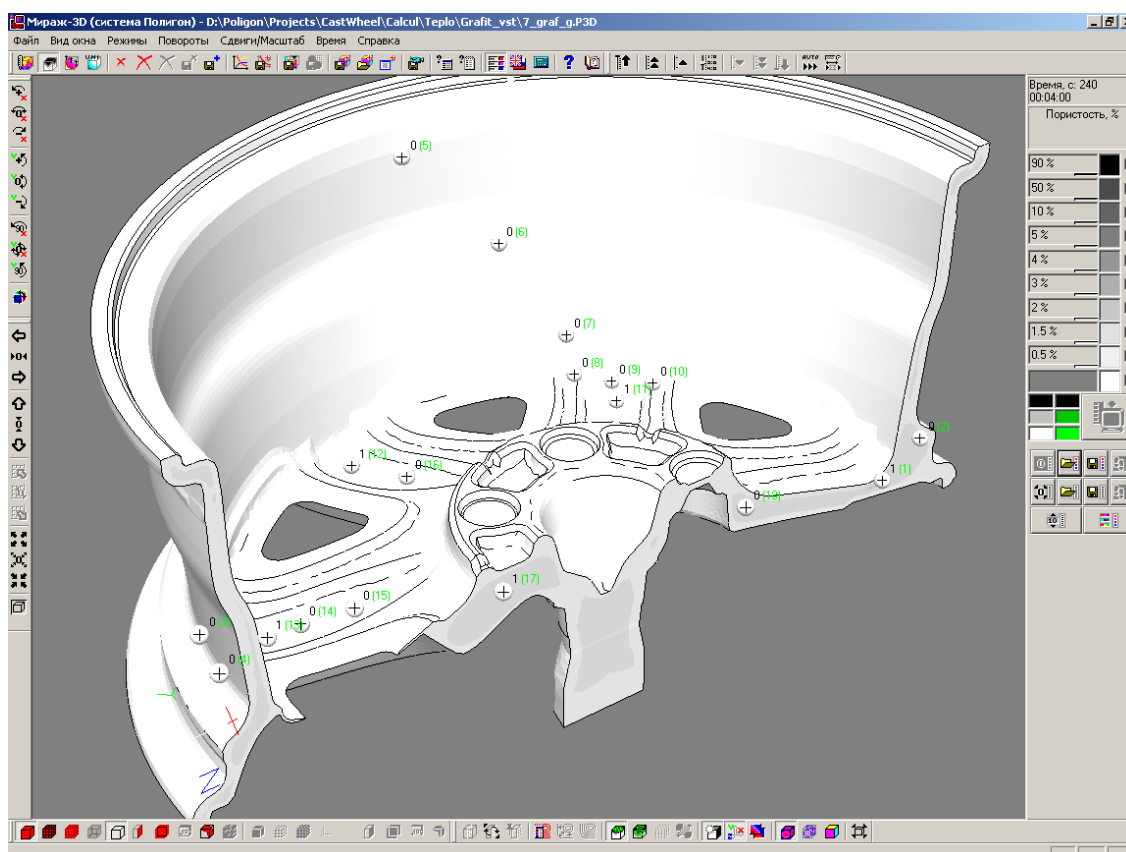
б – сечение отливки и графитовой части пресс-формы



а



б



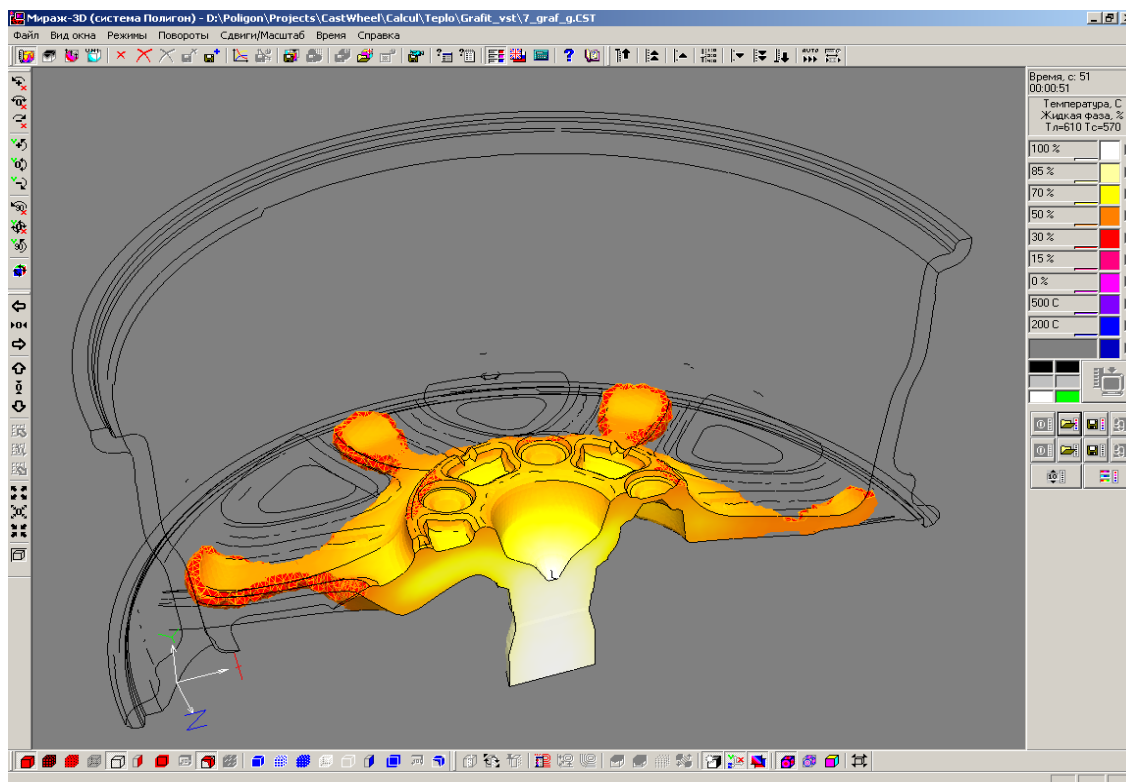
в

Рис. 11. Усадочные дефекты в теле отливки при установке графитовых вкладышей

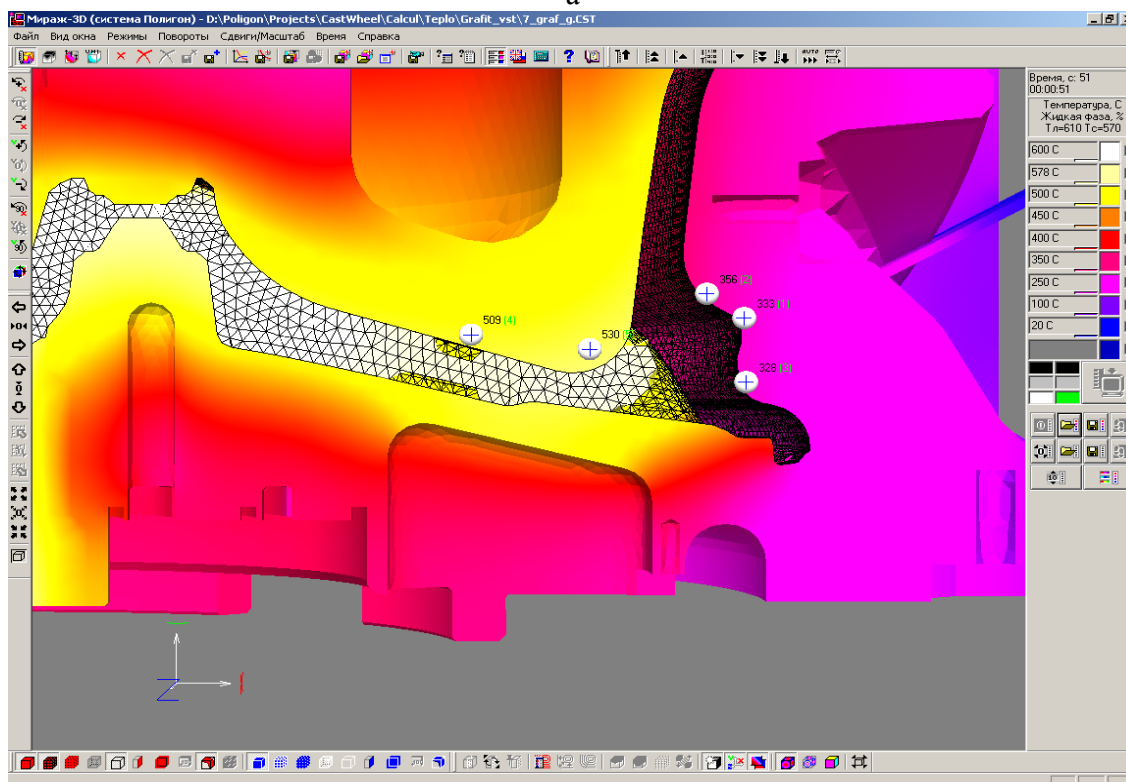
а – пористости выше 2% не обнаружено;

б – пористость выше 1,5%;

в – оценка дефектов на поверхности и в сечении отливки



а



б

Рис. 12. Причины, компенсирующие усадку в случае применения графитовых вкладышей

а – питание теплового узла продолжается на самых поздних стадиях его затвердевания;

б – местный разогрев TopCore вблизи массивной части

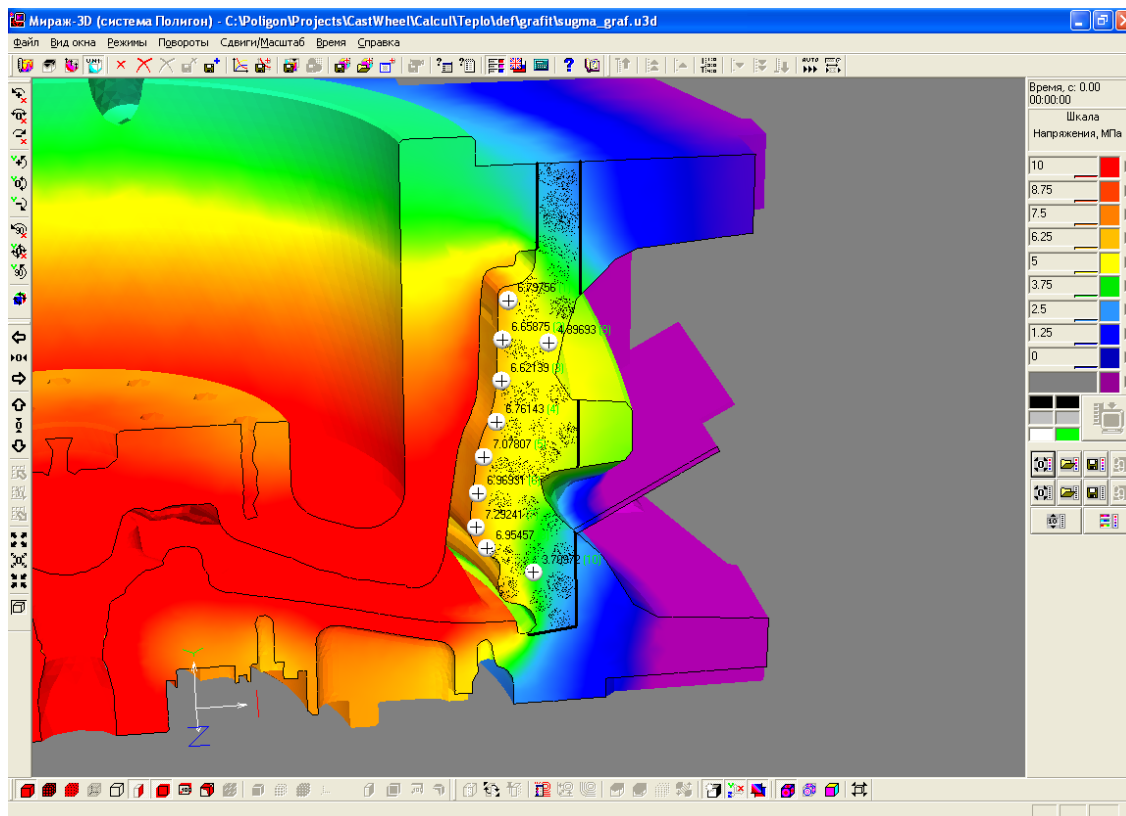


Рис. 13 Распределение термических напряжений в графитовой вставке

8. Выводы по отчету в целом

1. Построенная при моделировании циклограмма тепловой работы системы отливка-форма (рис. 2 б) практически соответствует экспериментальной циклограмме представленной заказчиком, что свидетельствует об адекватности процедуры моделирования.

2. Пресс-форма выходит на режим на 6-8 циклах при этом 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.

3. При работе по существующей технологии в месте соединения спицы с ободом наблюдается усадочная рыхлота порядка 10% объемных.

4. Установка в пресс-форме в проблемных зонах тепловых труб дает возможность полностью устранить в них усадочную рыхлоту. Однако существенного сокращения литейного цикла не наблюдается.

5. Выполнение формообразующих элементов внутренней боковой поверхности пресс-формы из графита является эффективным средством повышения качества отливки. Существенного сокращения литейного цикла не наблюдается. Термические напряжения в графитовой вставке находятся на уровне 7-7,5 МПа.

9. Рекомендации

Для повышения качества диска автомобильного колеса из сплава марки А 356, изготавливаемого методом литья под низким давлением, могут быть рекомендованы два технических решения:

1. Установка в пресс-форму в зону, оформляющую переход спицы в обод, тепловых труб.
2. Изготовление внутренней боковой поверхности пресс-формы из графита.