

АННОТАЦИЯ

Цель работы – оптимизация существующей в литейном производстве литейной технологии в автоклаве для изделия из сплава АЛ9ч и рассмотрение возможности изготовления отливки из высокопрочного алюминиевого сплава ВАЛ10.

В процессе работы с помощью СКМЛП «ПолигонСофт» проведено компьютерное моделирование базовой литейной технологии изготовления отливки в условиях автоклавного литья для сплава АЛ9ч. Рассмотрены различные варианты, связанные с вероятностными колебаниями свойств сплава и параметров технологии в условиях реального производства. На основании результатов моделирования проведен анализ процессов заливки, затвердевания, формирования тепловых узлов, образования раковин, макропористости и микропористости для разных вариантов свойств при колебаниях в условиях реального производства. По результатам моделирования базовой литейной технологии предложены различные варианты изменения базовой технологии с целью уменьшения вероятности возникновения и уменьшения уровня усадочных дефектов (максимальной пористости в теле детали). Проведено моделирование и анализ результатов моделирования новых вариантов технологии. Проведено компьютерное моделирование различных вариантов литейной технологии для высокопрочного алюминиевого сплава ВАЛ10. Выявлены особенности тепловых и усадочных процессов в отливке при применении сплава ВАЛ10, связанные с теплофизическими и усадочно-фильтрационными свойствами этого сплава, существенно отличающимися от аналогичных свойств сплава АК9ч. Показано, что применение сплава ВАЛ10 затруднено из-за возникновения значительного уровня усадочных дефектов при всех рассмотренных вариантах технологии.

1. Введение

Отливка изготавливается из алюминиевого сплава АК9ч способом литья в автоклаве. Характер применения детали диктует повышенные требования к ее эксплуатационным характеристикам, которые в свою очередь напрямую зависят от качества отливки. Одним из основных параметров качества отливки при заданном уровне механических свойств применяемого материала (сплава) является уровень усадочных дефектов, возникающих в процессе затвердевания отливки. Отливка характеризуется достаточно сложной разноразнотолщинной геометрией, что приводит к повышенной вероятности образования пористости и рыхлот и, соответственно повышенными требованиями к надежности и устойчивости литейной технологии, которая должна гарантировать минимальный уровень усадочных дефектов. Кроме того, была поставлена задача повышения механических свойств детали, что в рамках алюминиевых сплавов возможно лишь при применении высокопрочных сплавов типа ВАЛ10. Известно, что высокопрочные сплавы такого типа обладают повышенной склонностью к усадочным дефектам, что затрудняет разработку надежной литейной технологии традиционными методами.

В связи со всем этим было принято решение использовать средства компьютерного моделирования литейных процессов при оптимизации технологии для сплава АК9ч и проверки возможности использования сплава ВАЛ10 при различных вариантах технологии.

2. Исходные данные

Стержни: стержни на основе УКС, стержни из увлажненной смеси, стержни из плакированной смеси.

Форма: песчано-глинистая смесь.

Опоки: низа-1800x810x250; верха-1800x810x450.

Холодильники: чугун.

Температура заливки для АК9ч: 730 гр.

Температура заливки для ВАЛ10: 750 гр.

Время заливки: практически 25-30 сек., (по технологии не более 50 сек.).

Давление в автоклаве (в основное время затвердевания): 6.2-6.5 атм.

Геометрия отливки, стержней и холодильников: предоставлена в виде чертежей и компьютерной трехмерной модели, построенной в CAD-системе ProIngenеer.

3. Подготовка данных для компьютерного моделирования

Многие исходные данные, необходимых для проведения моделирования, существенно отличаются от технологических параметров, регламентируемых технологией. Это касается как геометрических моделей, так и негеометрических параметров, вводимых в систему моделирования. Например, по сплаву в технологии задается химический состав и методика приготовления и подготовки сплава, а для моделирования необходимы теплофизические и т.п. данные (теплоемкость, теплопроводность, скрытая теплота затвердевания и др.), которые хотя и определяются составом сплава, но напрямую в технологии не присутствуют. То же самое и по геометрии – для проведения моделирования необходима не просто трехмерная компьютерная модель, построенная в некоторой CAD-системе, а специально дискретизированная геометрия (для СКМ «ПолигонСофт» - конечно-элементная сетка) отливки, формы, различных элементов формы (холодильников и пр.). Соответственно подготовка данных для моделирования представляет собой отдельный этап работ.

3.1. Исходная геометрическая модель

Рис.3.1. Исходная ГМ построена в системе ProIngenеer и содержит собственно отливку с литниково-питающей системой и элементы формы – холодильники и стержни.

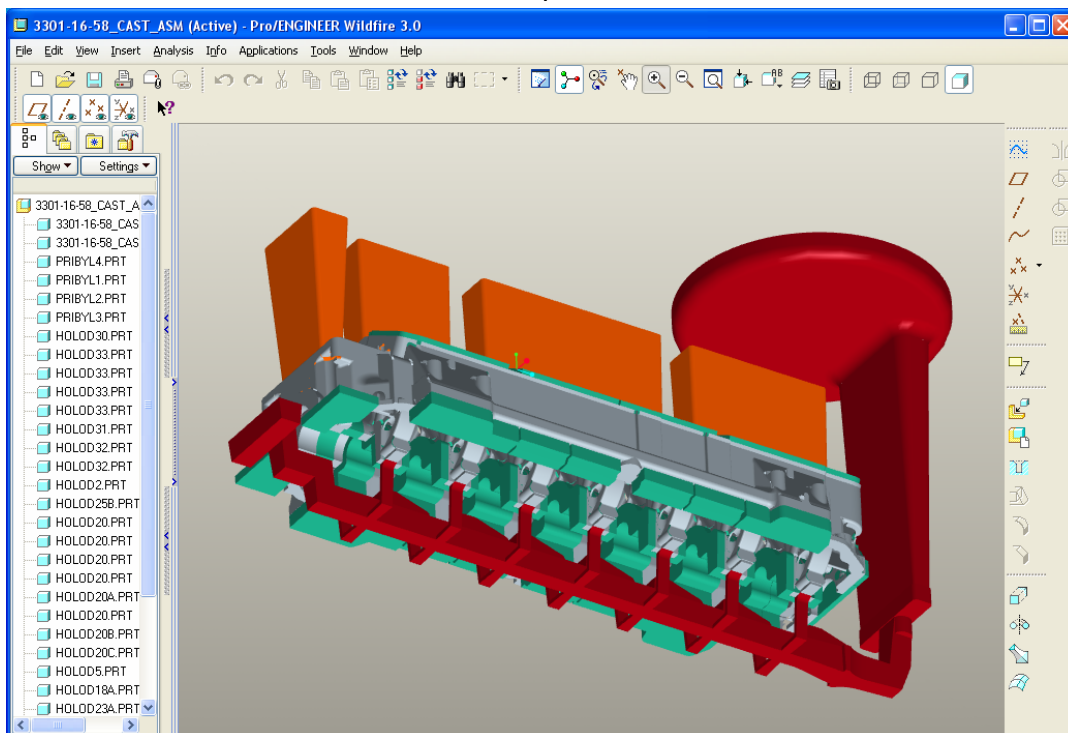


Рис.3.1 Исходная геометрическая модель.

3.2. Расчетная геометрическая модель

На основе исходной ГМ была сгенерирована единая объемная конечно-элементная сетка отливки, элементов формы (холодильники и стержни) и формы (рис.3.2), что все вместе представляет собой расчетную ГМ, которая собственно и используется при моделировании.

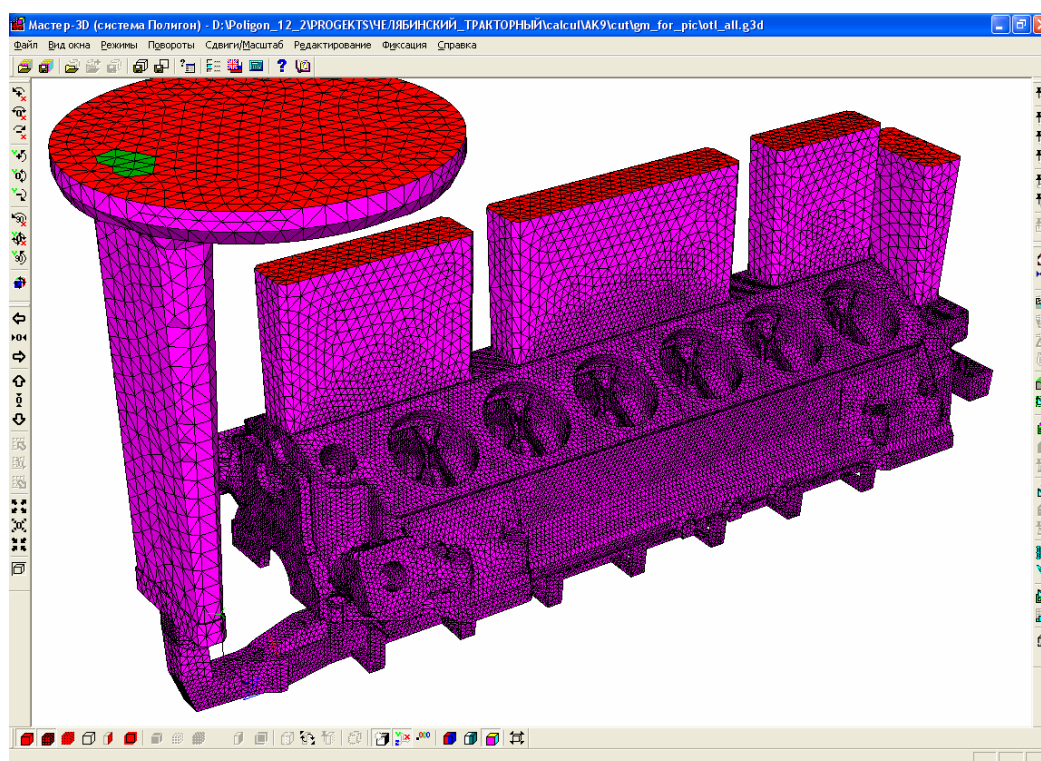


Рис.3.2. Конечно-элементная сетка отливки (расчетная ГМ)

Поскольку геометрия отливки и формы в данном случае обладает почти полной зеркальной симметрией, то для ускорения расчетов имеет смысл использовать не полную ГМ, а ее половину (Рис.3.3), а на границе симметрии задать т.н. «нулевые» граничные условия, которые полностью соответствуют реальной границе симметрии без какого либо потери адекватности и точности моделирования.

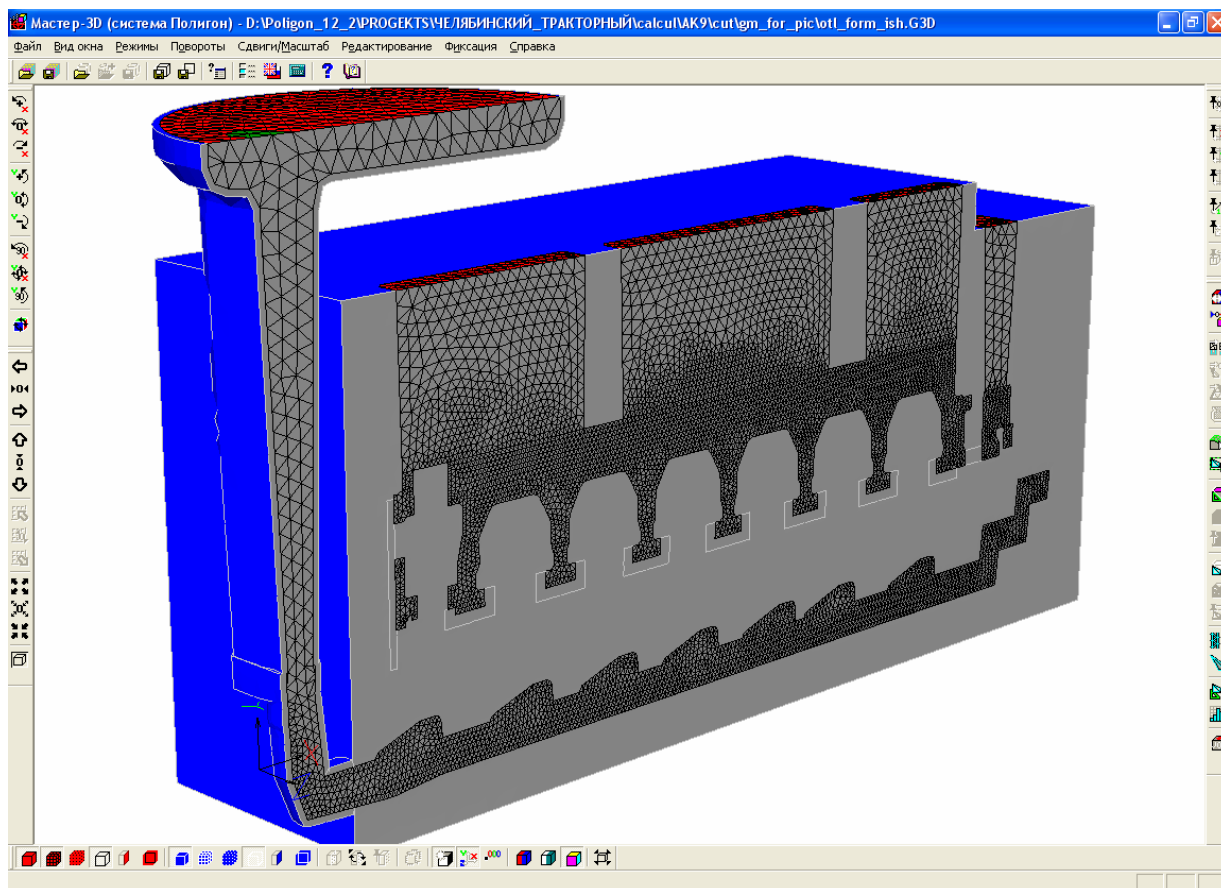


Рис.3.3. Граница симметрии «половинной» расчетной ГМ

3.3. Исходные данные для моделирования. Физические свойства сплавов и др

Как уже указывалось выше, исходные данные для моделирования несколько отличаются от данных, регламентируемых в технологических картах. Все физические свойства сплавов, которые были использованы в расчете приведены на рис.3.4-3.7. Эти данные (а также данные по свойствам материалов формы, стержней, холодильников и условий теплопередачи на границе «отливка-форма») взяты из базы данных СКМ ЛП «ПолигонСофт». Большая часть данных по свойствам литейных алюминиевых сплавов определялась экспериментально специалистами ФГУП «ЦНИИМ» специально для «ПолигонСофт», а некоторые внесены в базу данных системы «ПолигонСофт» из литературных источников, справочников и специализированных руководящих материалов типа РТМ, ОСТ, ГОСТ и т.п.

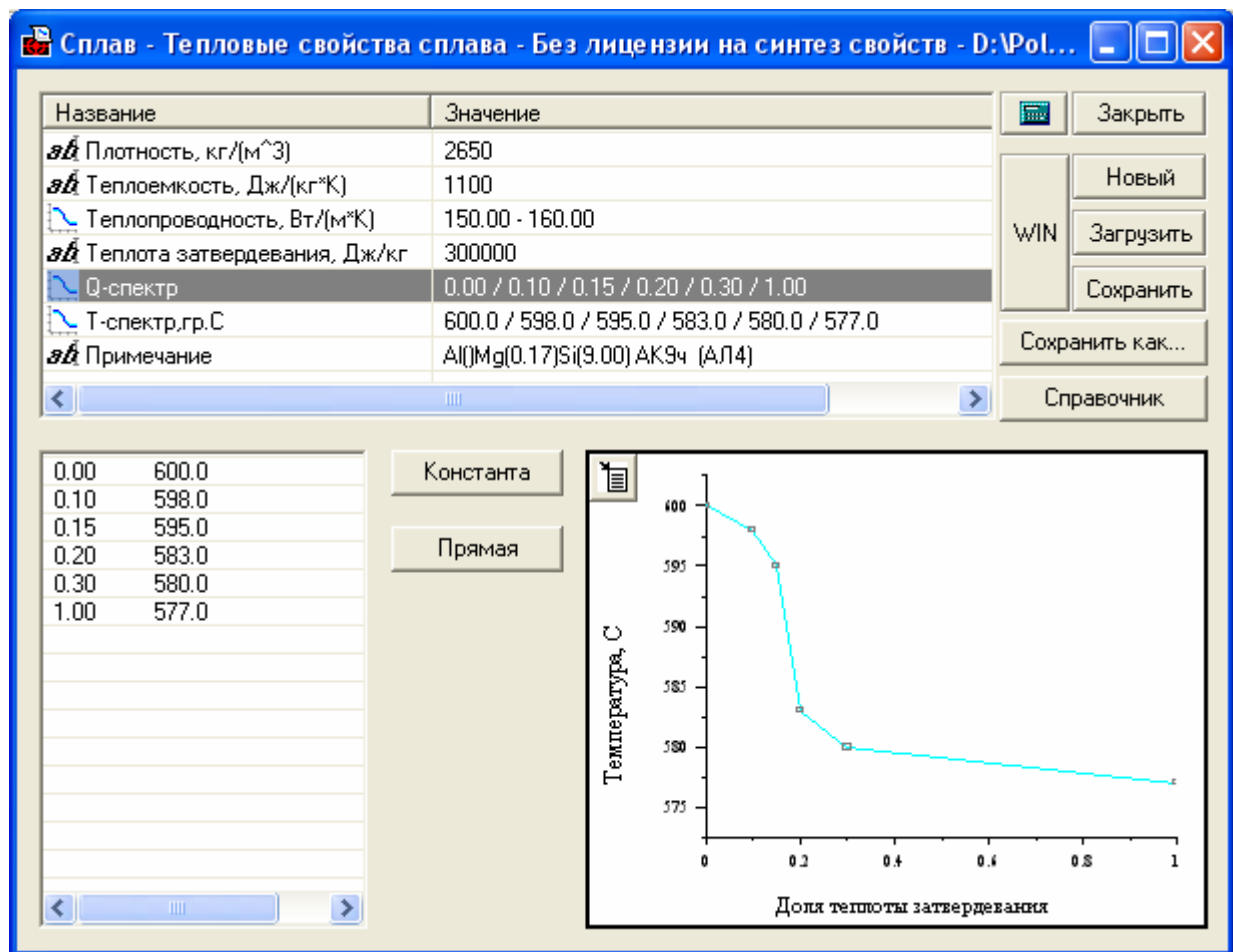


Рис.3.4. Теплофизические свойства сплава АК9ч

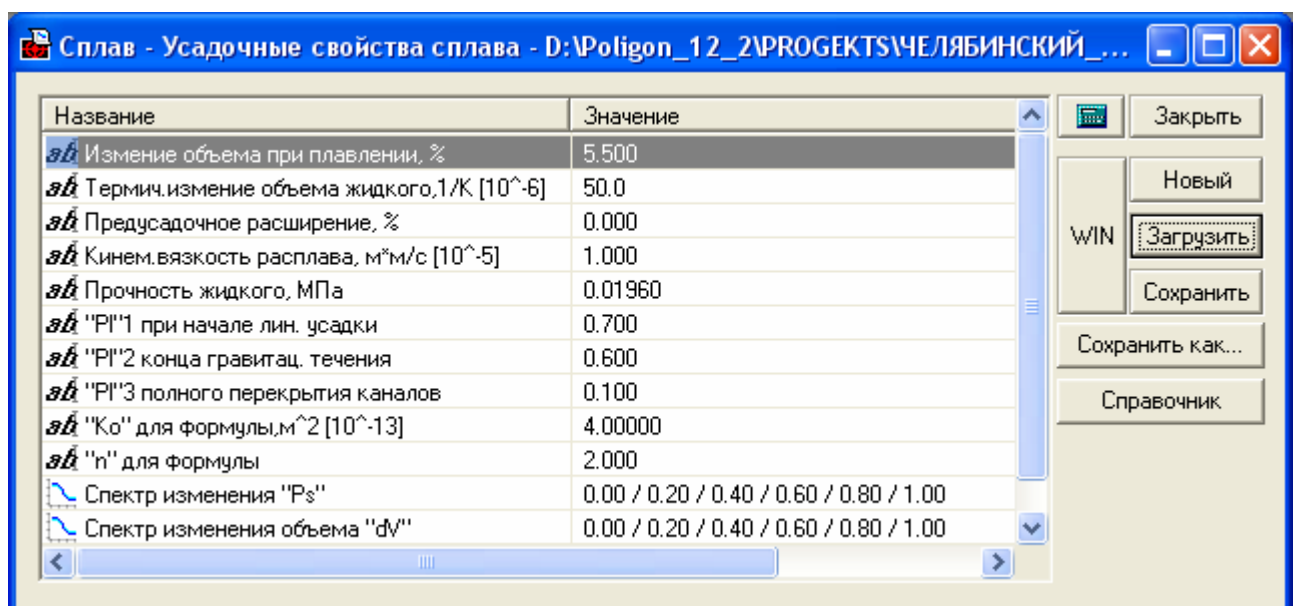


Рис.3.5. Усадочно-фильтрационные свойства сплава АК9ч

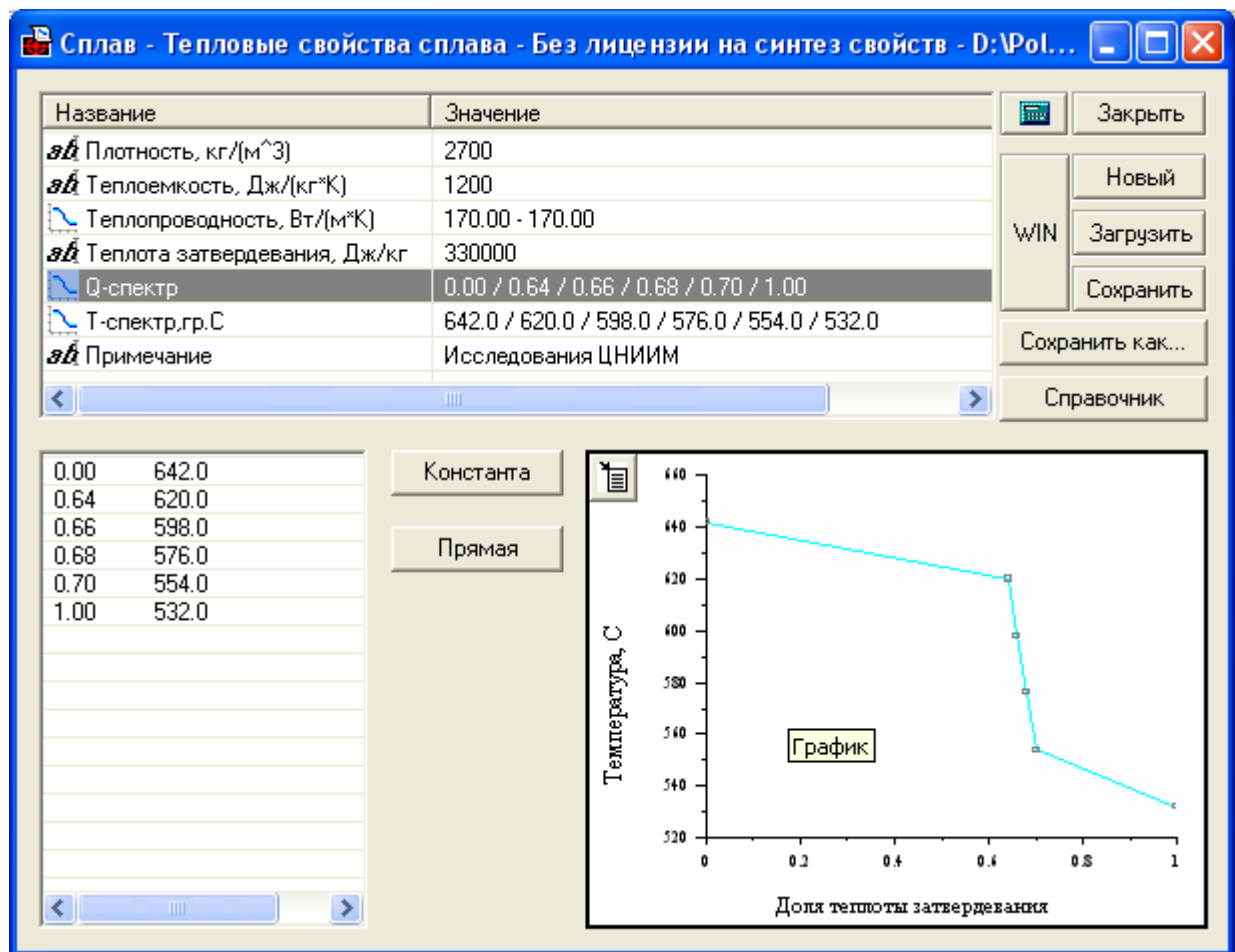


Рис.3.6. Теплофизические свойства сплава ВАЛ10

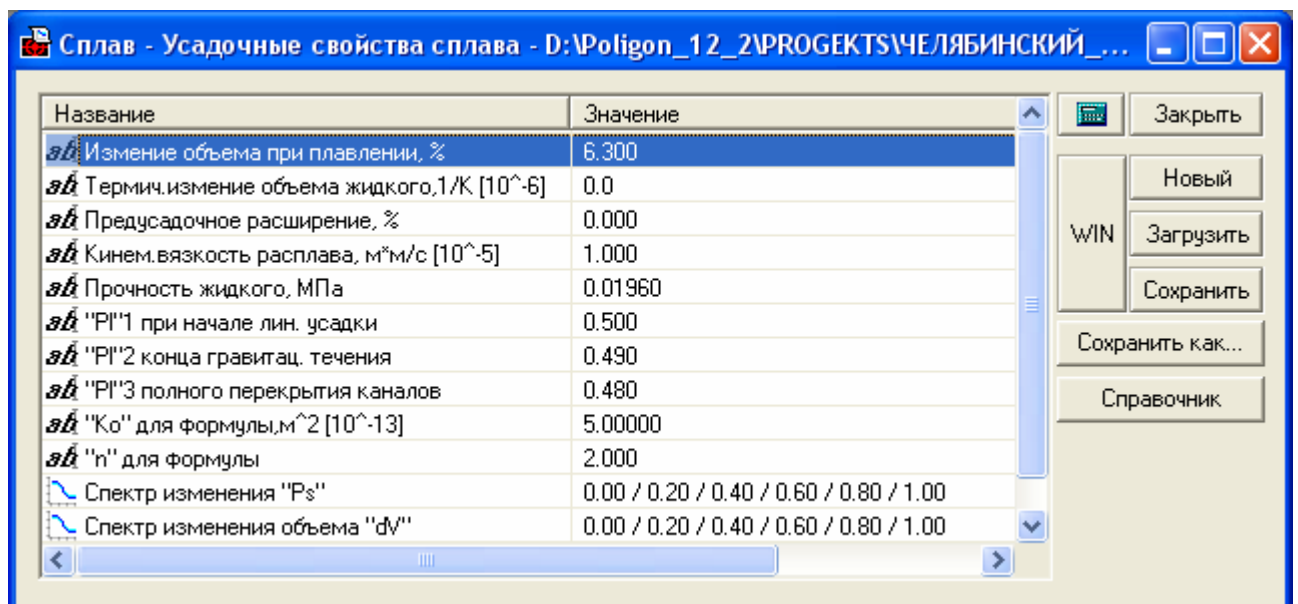


Рис.3.7. Рис.3.5. Усадочно-фильтрационные свойства сплава ВАЛ10

4. Моделирование процесс литья по базовой технологии

4.1. Сплав АК9ч

Геометрическую модель отливки с литниково-питающей системой представил Заказчик. Геометрическая модель, разбитая на конечные элементы, показана на рис. 4.1.

Динамику течения металла в литейной форме на 5-ой, 15-ой и 35-й секундах демонстрируют рис. 4.2 – рис. 4.4. Тридцать пятая секунда – это время окончания заливки. За время заливки металл в литейной форме охлаждается от 730°C в стояке до $597\text{--}598^{\circ}\text{C}$ в прибылях (при ликвидусе сплава АК9ч 600°C). В процессе заливки СКМ ЛП «ПолигонСофт» дает возможность непрерывно в режиме реального времени отслеживать температуру металла в любой точке отливки или формы. Кроме того, СКМ ЛП «Полигон» позволяет исследовать скорости потока металла (рис. 4.5).

На следующем этапе исследовали процесс затвердевания отливки в форме. На рис.4.6 – рис. 4.8 показано изменение в процессе охлаждения доли жидкой фазы в каждом сечении отливки в начале процесса затвердевания, на 5-й и 270-й секундах затвердевания. На рис.4.9, для примера, приведено распределение температур в форме в конце затвердевания отливки. Уже на рис. 4.8 можно наблюдать формирование тепловых узлов примерно в районе 270 секунды в области силовых перегородок, которые изолируются от питания прибылями. Особенно наглядно это демонстрирует рис. 4.10, где выделены только участки отливки, в которых еще сохраняется жидкая фаза (изоповерхность солидус). Соответственно в этих же зонах отливки формируются усадочные дефекты, при этом пористость в них достигает до 2% (рис.4.11, рис. 4.12). Моделирование образования усадочных дефектов требует дополнительных комментариев.

В СКМ ЛП «ПолигонСофт» используется модель образования макро- и микропористости, предполагающая наличие в интервале затвердевания трех критических точек: P_{ln} – доля жидкого при начале линейной усадки («схватывание» дендритного каркаса); P_{lg} – доля жидкого при прекращении гравитационного течения; P_{lo} – доля жидкого при полном перекрытии междендритных каналов. Хотя названия этих точек отражают некоторый физический смысл, но в значительной мере эти названия условны. Более правильным будет считать, что данные точки просто регламентируют смену поведения расплава в двухфазной зоне с точки зрения протекания процесса образования усадочных дефектов. В упрощенном виде можно считать, что P_{ln} , P_{lg} и P_{lo} определяют ширину зоны питания в интервале между ликвидусом и солидусом. Широкую область питания в интервале ликвидус-солидус будем называть «мягкие условия питания», а узкую область питания – «жесткими условиями питания».

Эти параметры имеют тенденцию изменяться случайным образом в относительно широких пределах даже при тщательном контроле за стабильностью параметров используемой литейной технологии. Например, влияние на них может оказывать изменение химического состава сплава в пределах марочного, содержание нерегламентированных примесей, та или иная влажность формы, начальная температура расплава. Именно из-за этого невозможно увидеть две абсолютно одинаковые раковины или две абсолютно одинаковые рыхлоты в двух одинаковых отливках, даже если они заливались одновременно при одних и тех же контролируемых условиях.

Сужение зоны питания («жесткие условия питания») сплава АК9ч приводит к формированию усадочной пористости объемом 5% (рис. 4.13). В связи с этим необходимо считать, что при изготовлении оливки по базовой технологии в зоне силовых перегородок возле анкерных отверстий образуется пористость с максимальными значениями от 2 до 5 % для «мягких» и «жестких» условий соответственно. Т.е., поскольку в реальности вероятностным образом могут происходить колебания от «мягких» условий до «жестких», то в части отливок пористость будет не более 2%, а в части будет доходить до 5%.

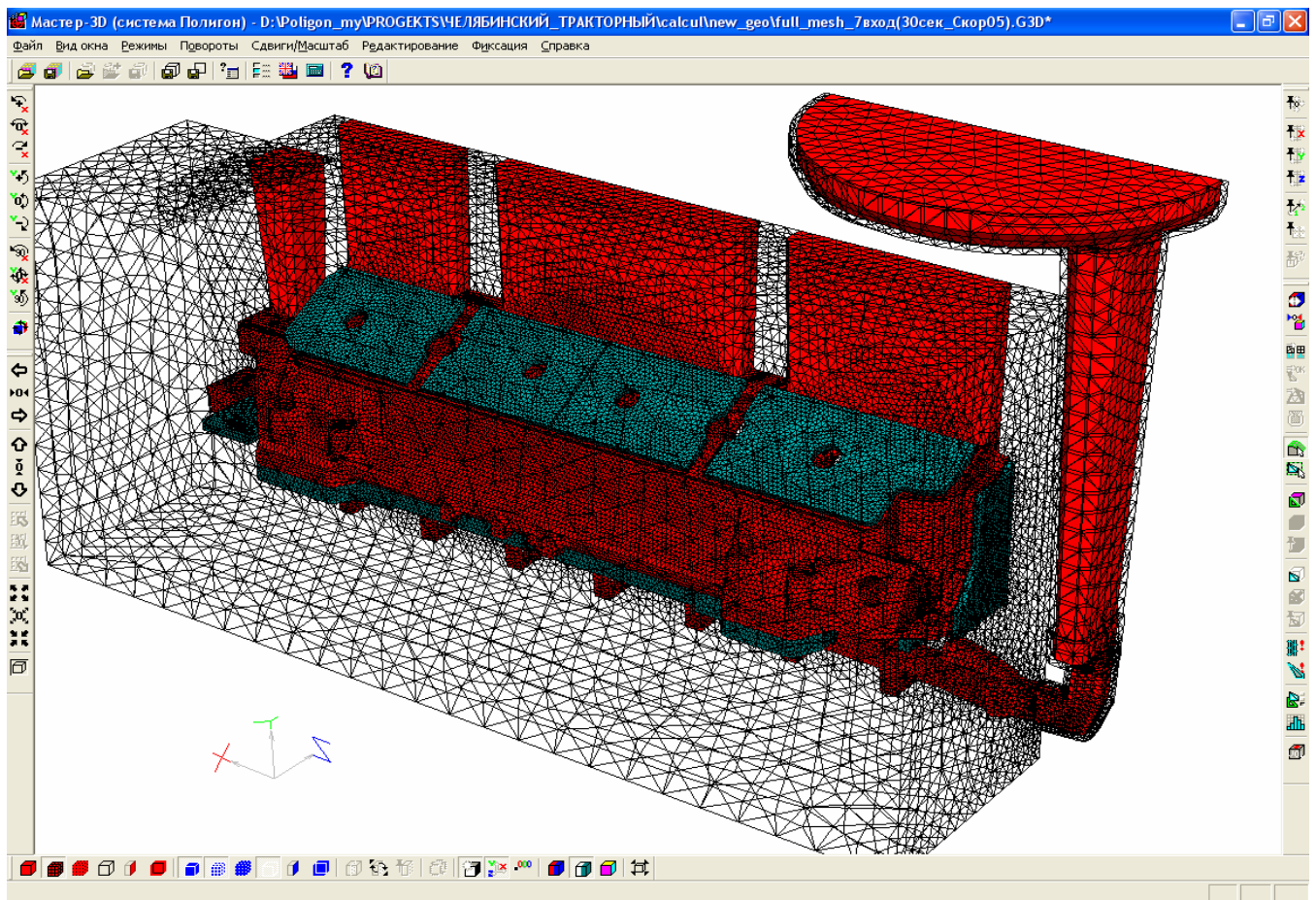


Рис. 4.1. Геометрическая модель, разбитая на конечные элементы.

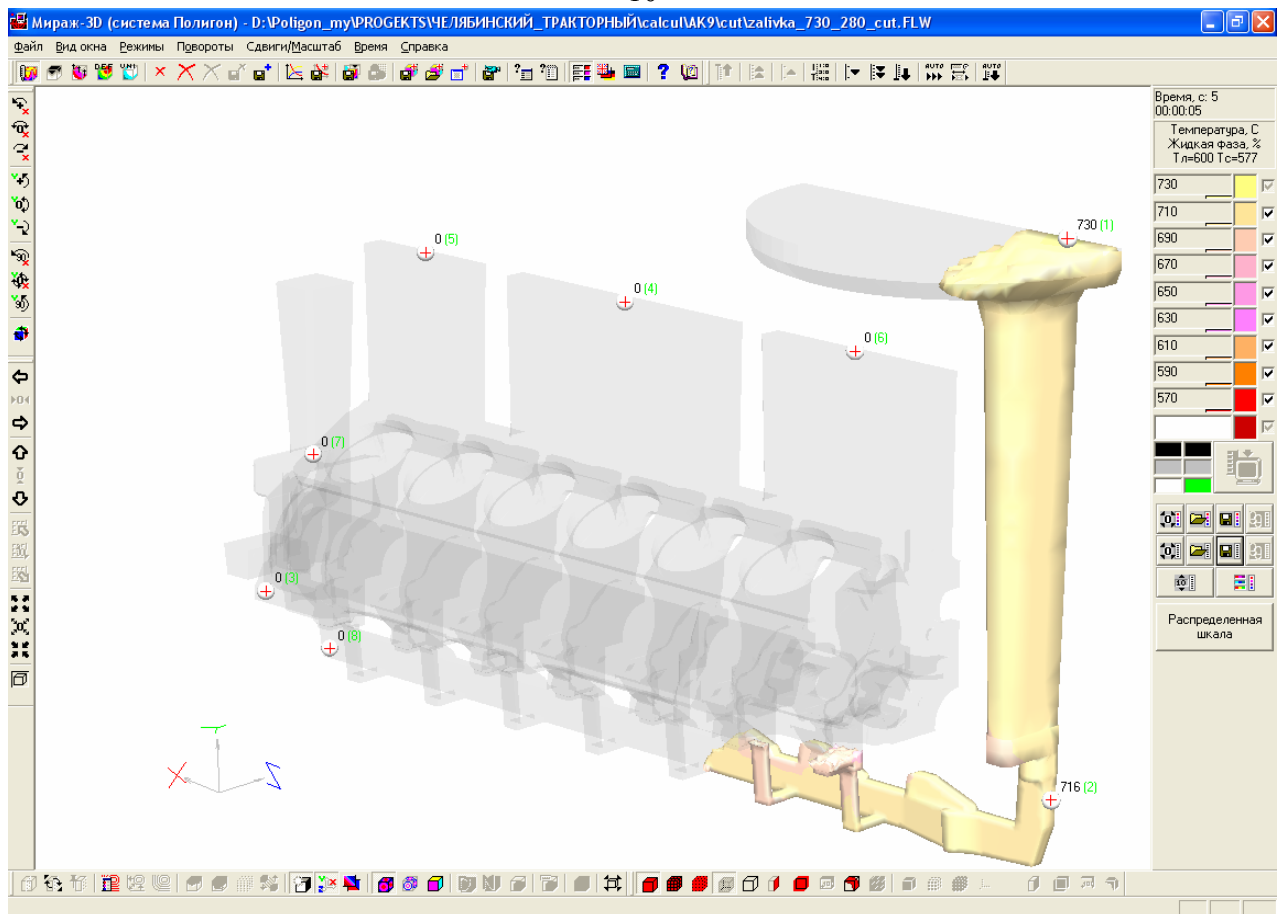


Рис. 4.2. Заливка сплава АК9ч, 5-ая сек.

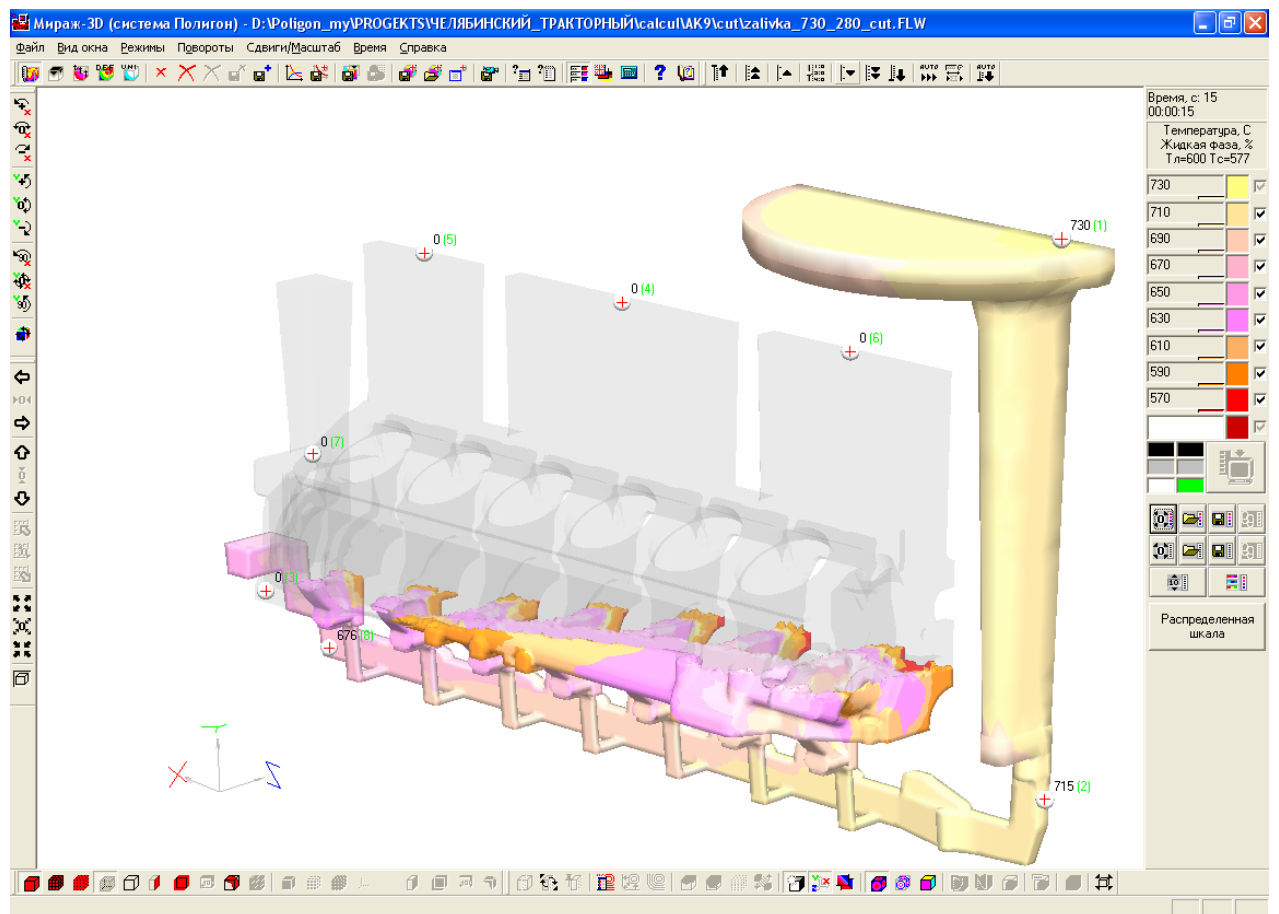


Рис. 4.3. Заливка сплава АК9ч, 15-ая сек.

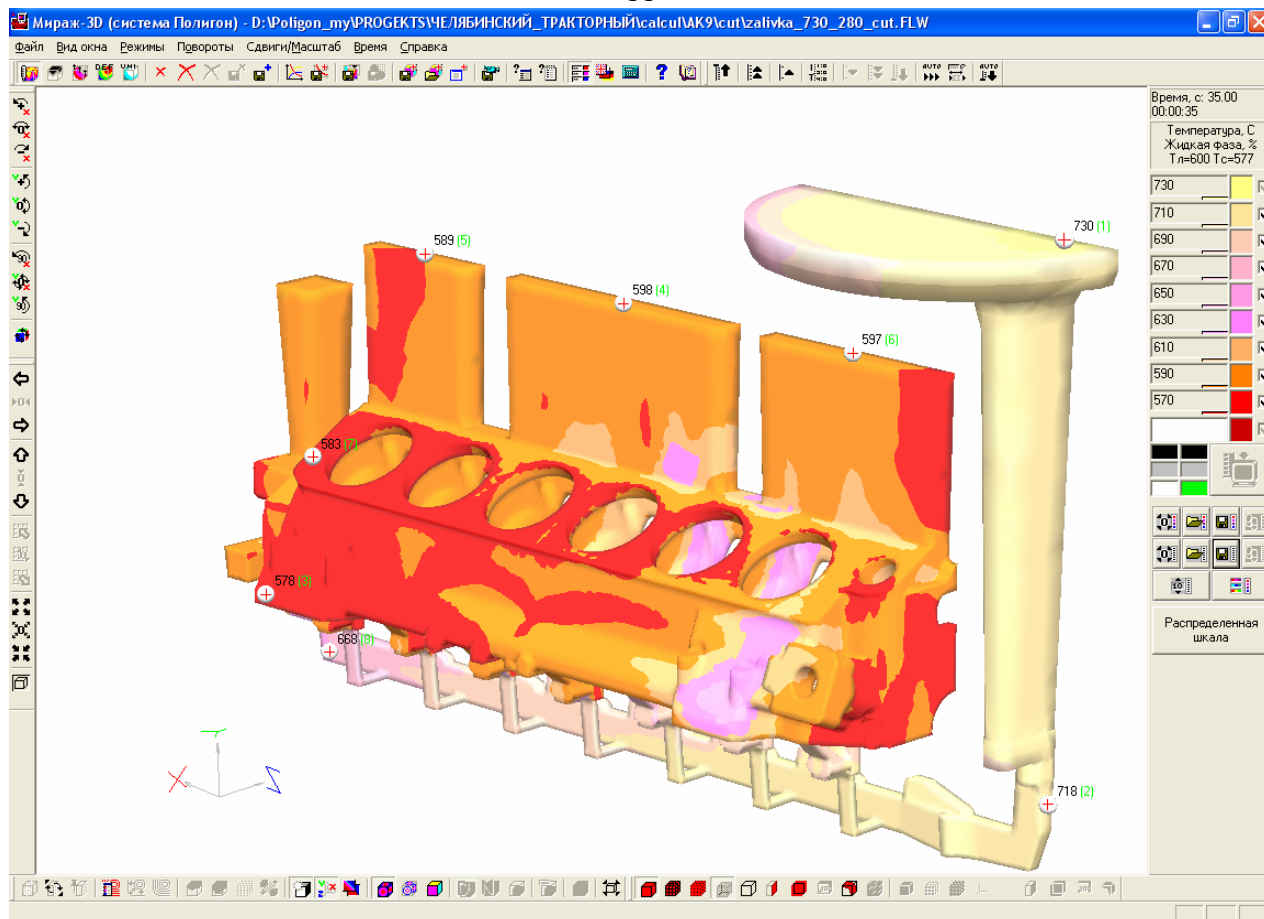


Рис. 4.4. Заливка сплава АК9ч, 35-ая сек.

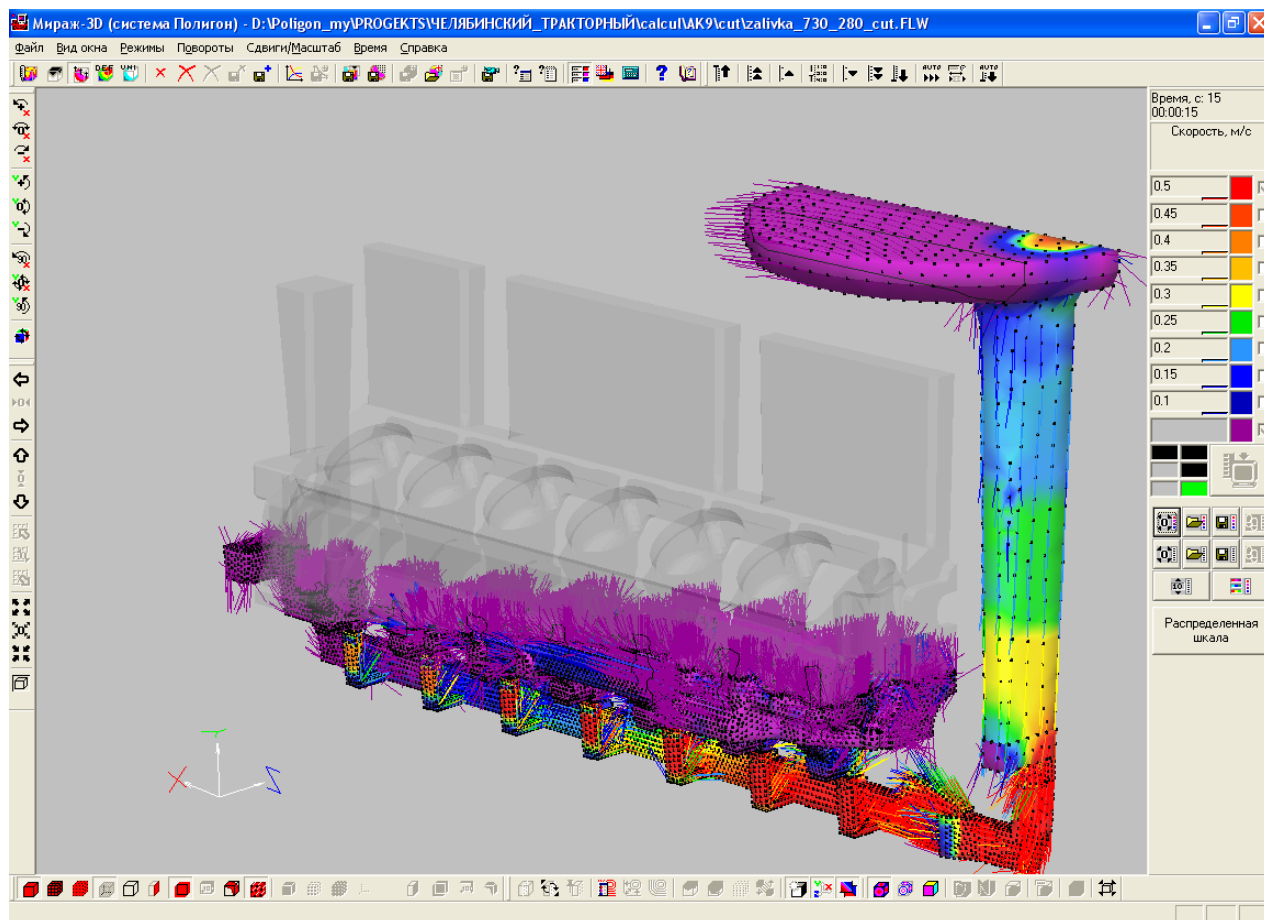
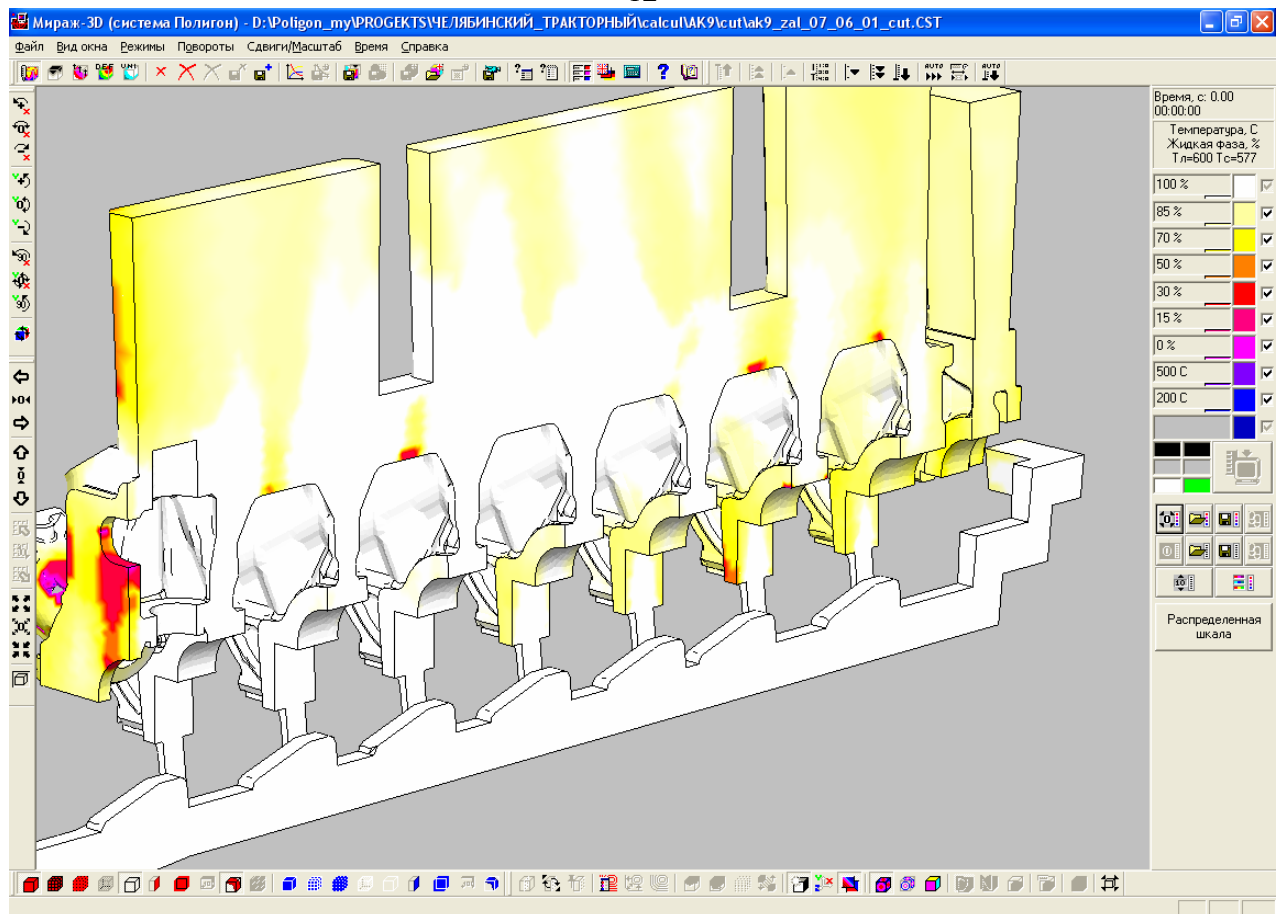
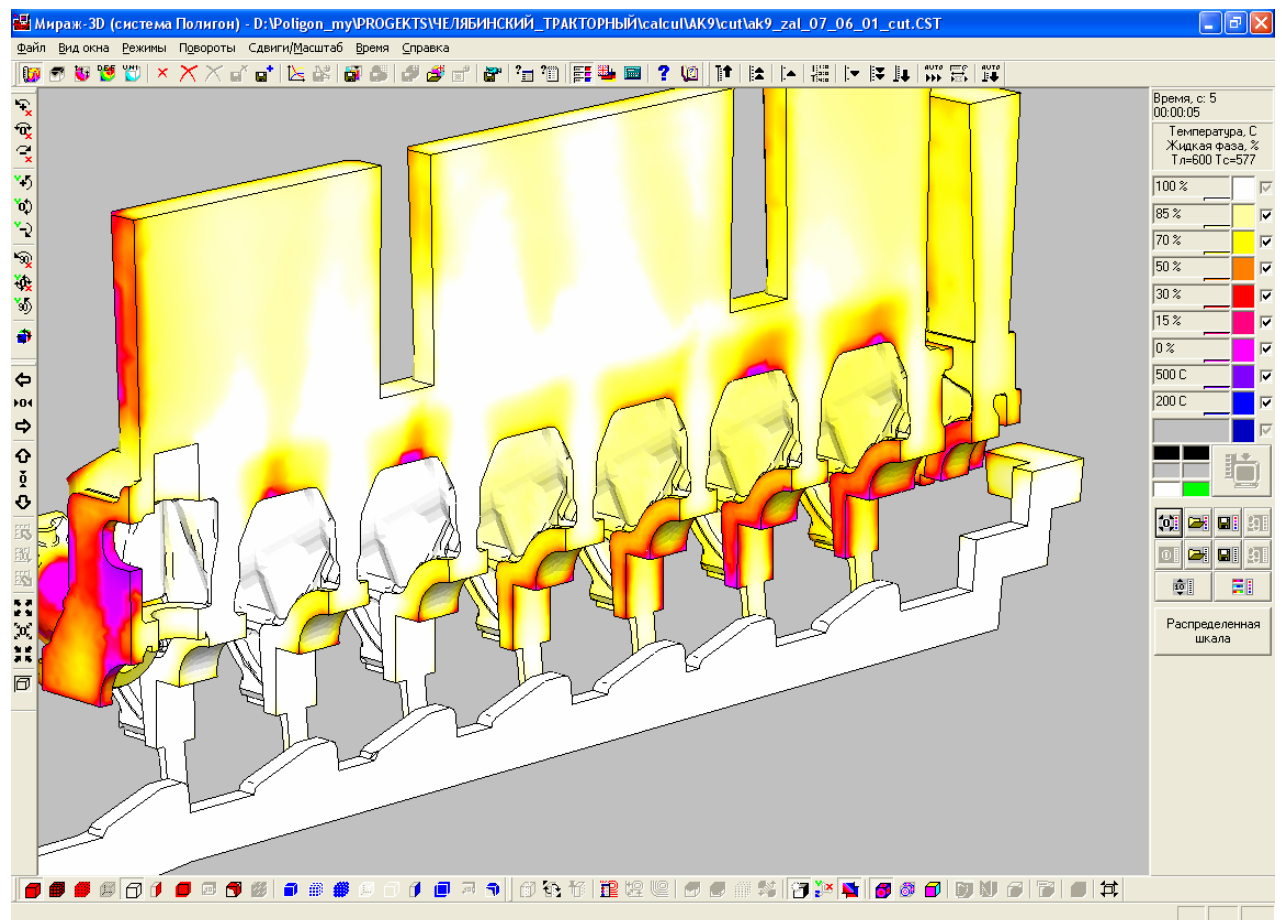


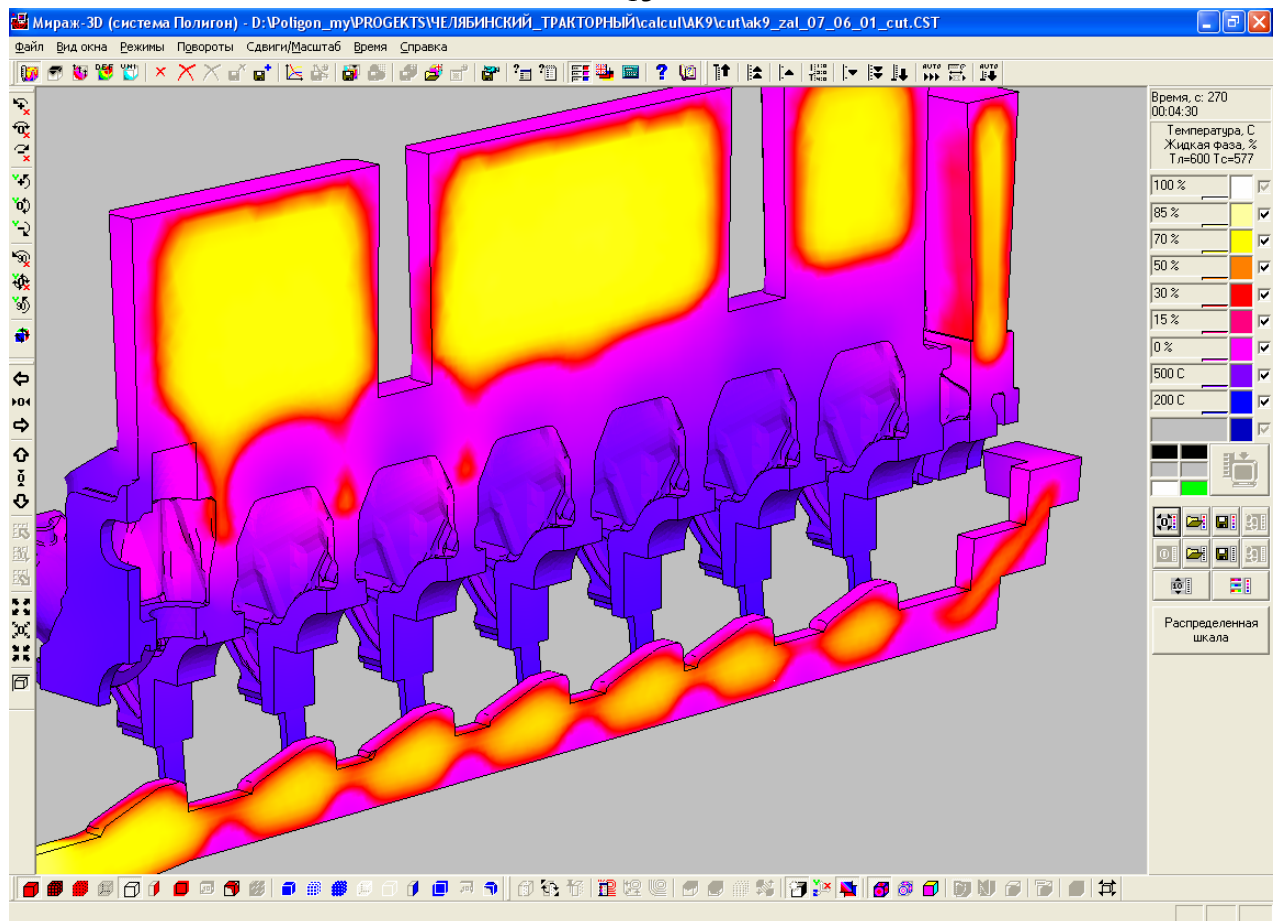
Рис. 4.5. Вектора скоростей потока в процессе заполнения формы металлом



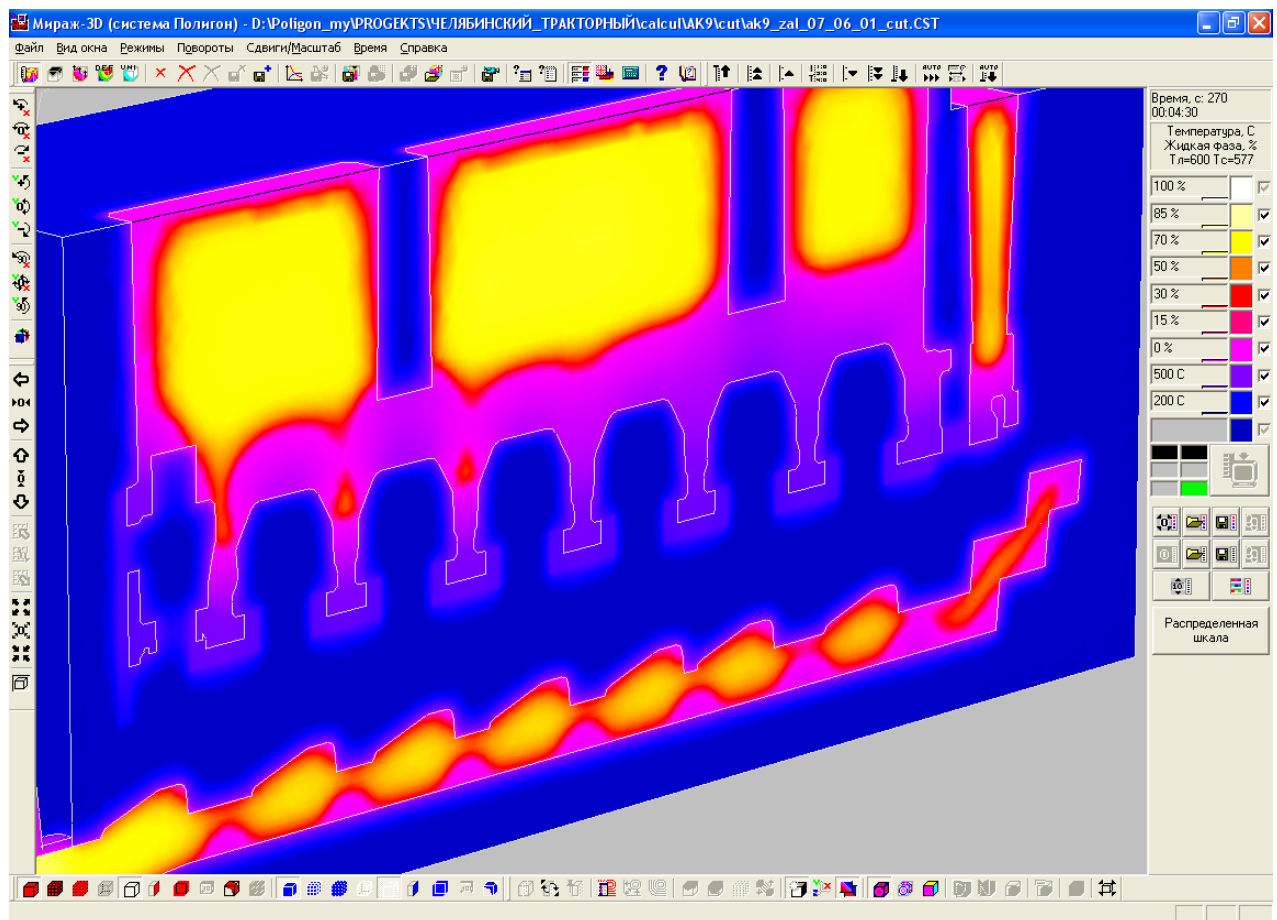
4.6. Распределение жидкой фазы в процессе затвердевания. Нулевой момент времени (конец заливки).



4.7. Распределение жидкой фазы в процессе затвердевания. 5-ая секунда от начала затвердевания.



4.8. Распределение жидкой фазы в процессе затвердевания. 270-ая секунда от начала затвердевания.



4.9. Распределение температур в форме.

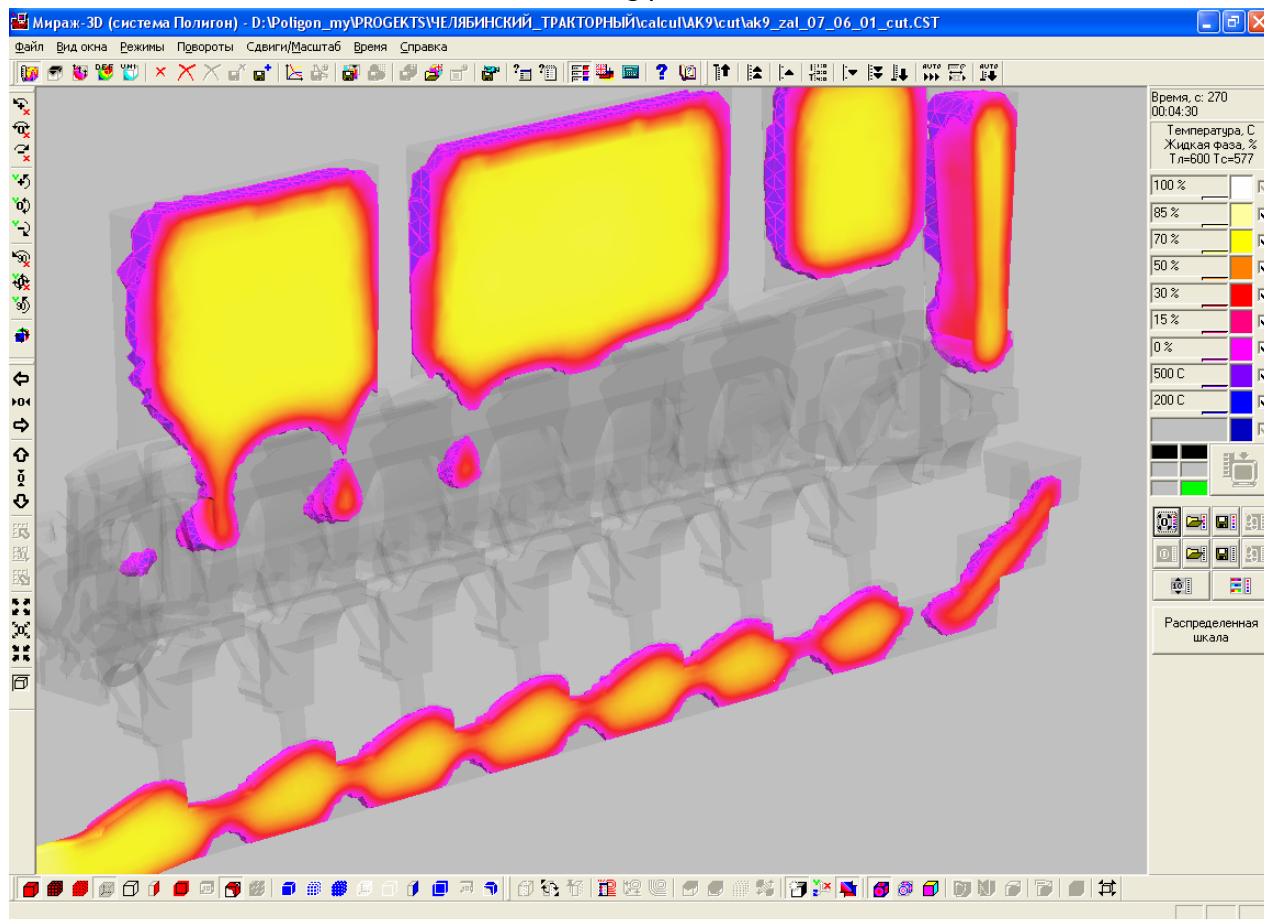


Рис. 4.10. Изолинии солидус на 270-й секунде затвердевания.

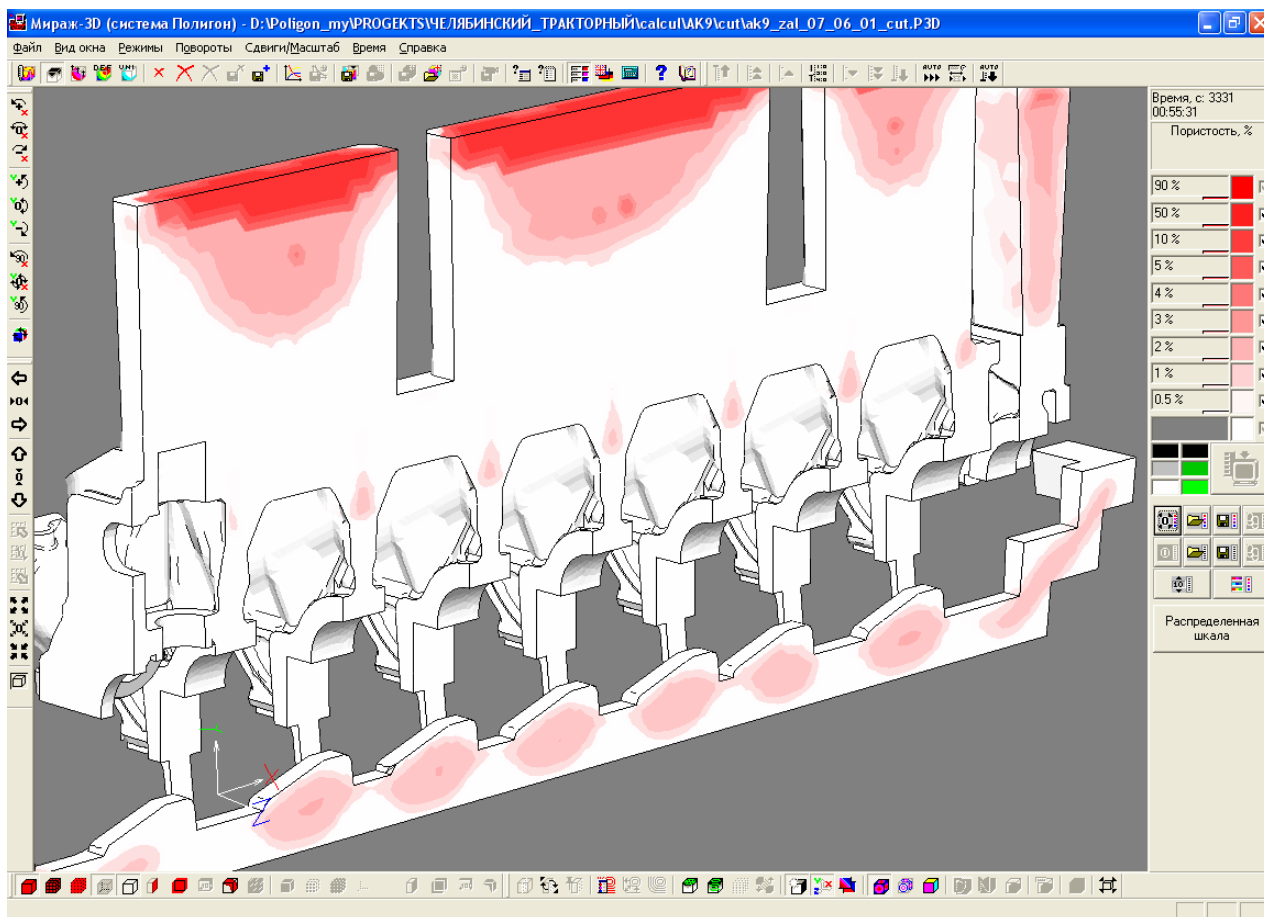
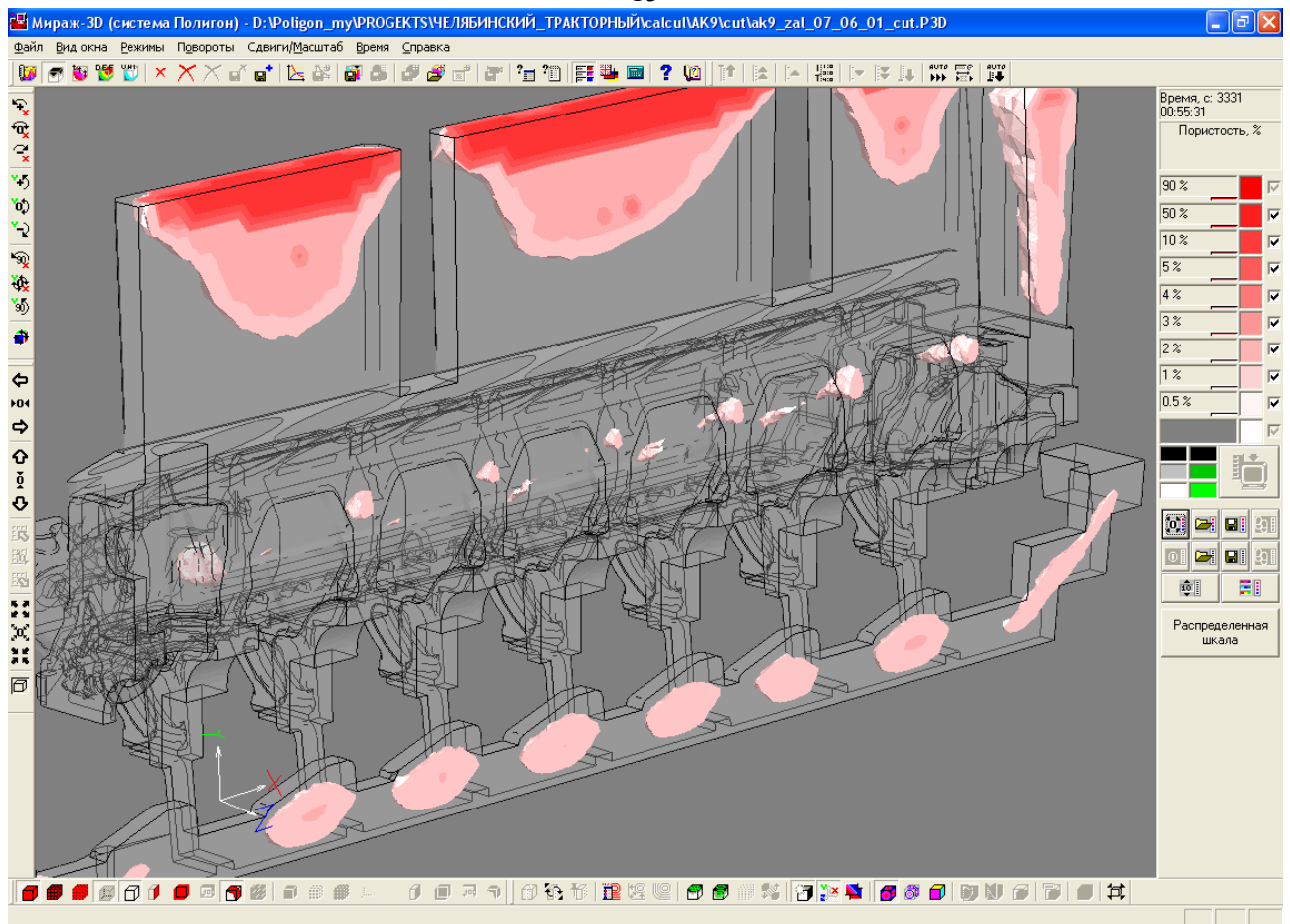
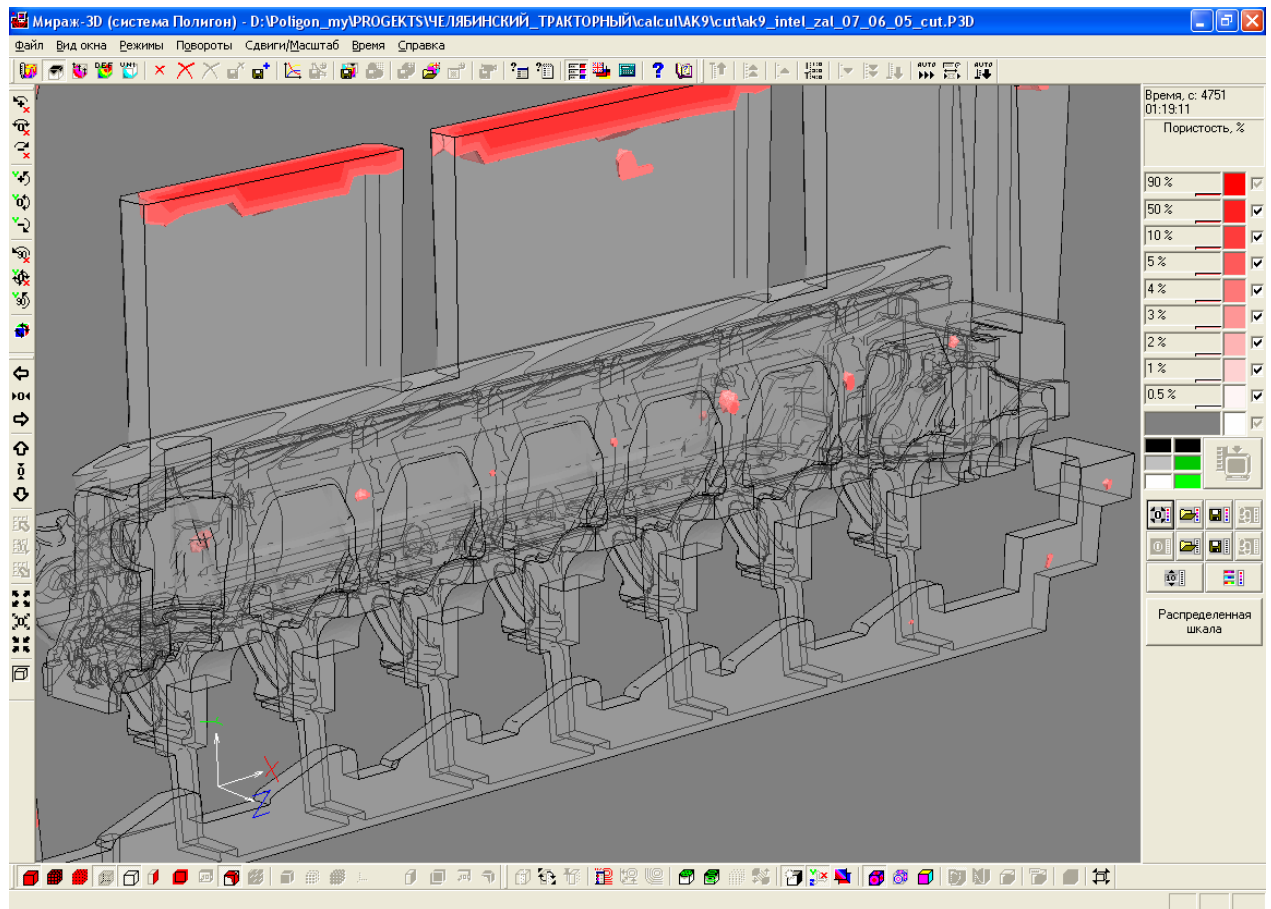


Рис. 4.11. Распределение усадочных дефектов в отливке



4.12. Участки отливки, имеющие усадочные дефекты объемом 2% («мягкие условия питания»)



4.13. Участки отливки, имеющие пористость до 5% («жесткие условия питания»)

Аналогичная последовательность моделирования (заливка-затвердевание-формирование усадочных дефектов) была проведена для процесса изготовления детали из сплава марки ВАЛ10.

Динамика заполнения формы сплавом марки ВАЛ10 не отличается от таковой для сплава марки АК9ч. Отличие наблюдается в распределении температур в отливке в конце заливки (рис. 4.14). Следует отметить, что в конце заливки температура металла в прибылях составляет 640°C , однако и ликвидус сплава ВАЛ10 составляет 642°C .

Существенным отличием сплава ВАЛ10 от сплава АК9ч является наблюдаемый очень ранний (на 120 секунде) отрыв тепловых узлов от питания прибылями (рис. 4.15). Объясняется это природой сплава ВАЛ10, а именно широким интервалом затвердевания (110°C , в отличие от 23°C у сплава АК9ч). Образующийся столь рано в интервале затвердевания твердый каркас затрудняет питание на столько, что даже избыточное давление в автоклаве не улучшает питания тепловых узлов. Эти особенности сплава ВАЛ10 приводят к формированию в силовых перегородках и на лапах крепления (рис. 4.16) усадочных раковин.

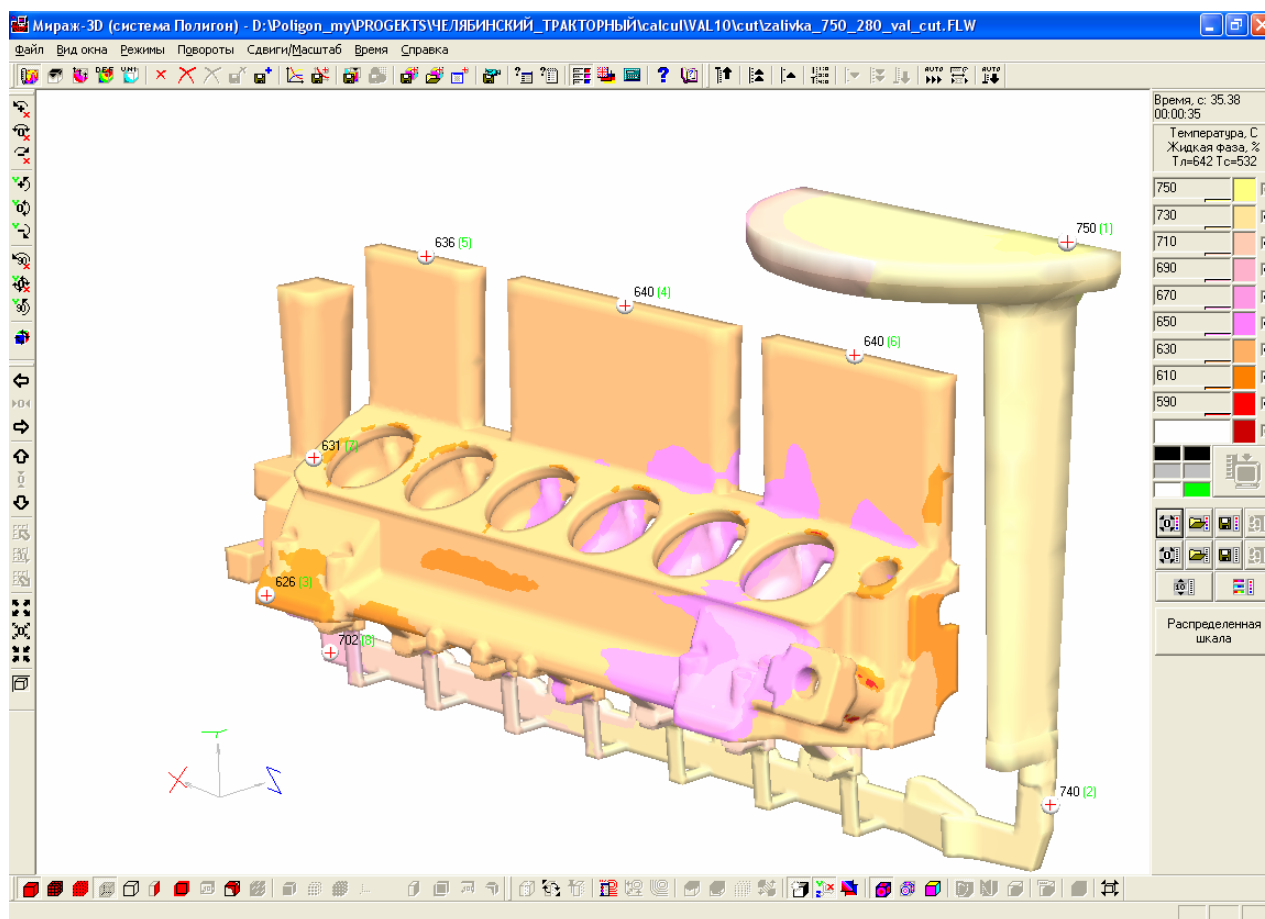


Рис. 4.14. Распределение температур в отливке на момент окончания заливки.

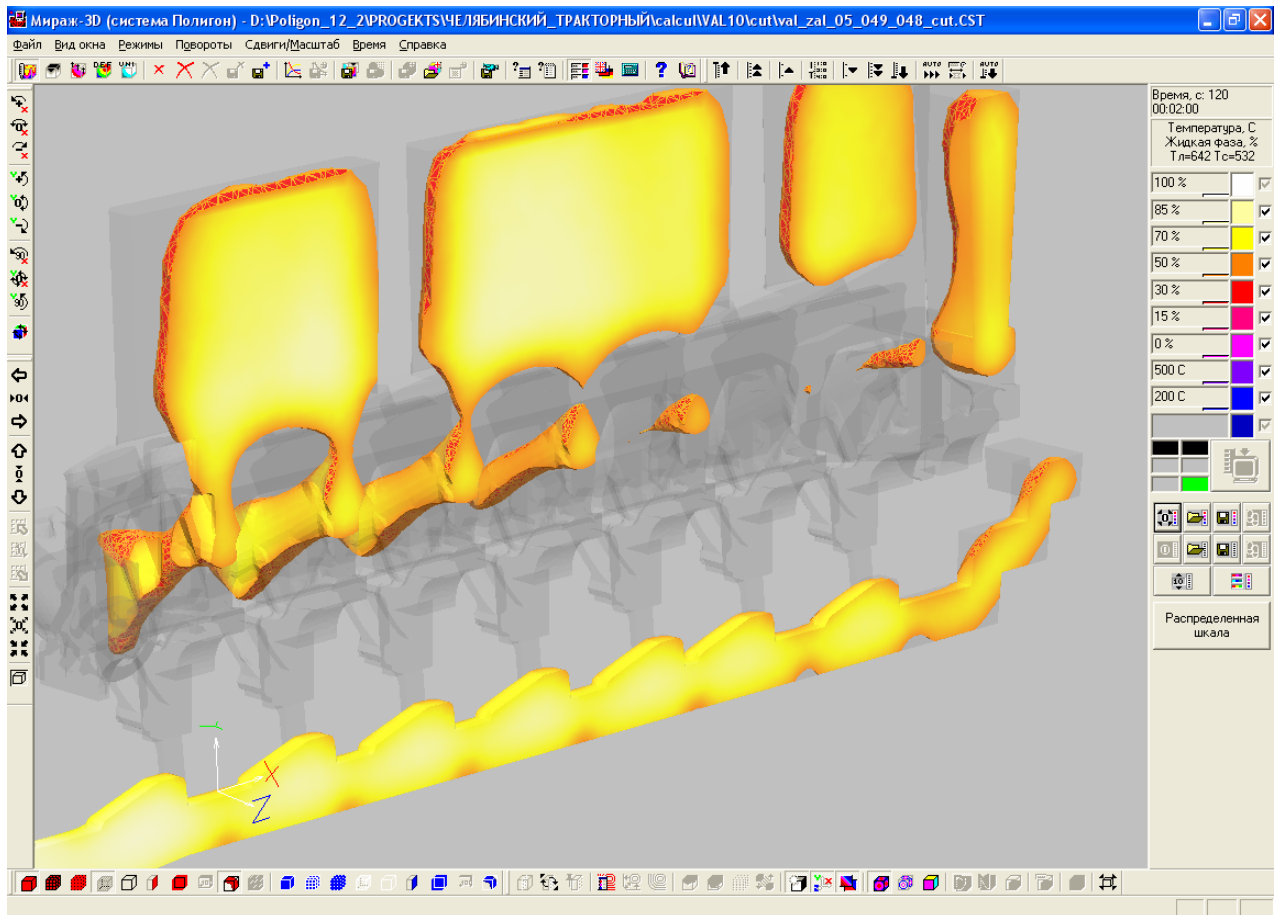
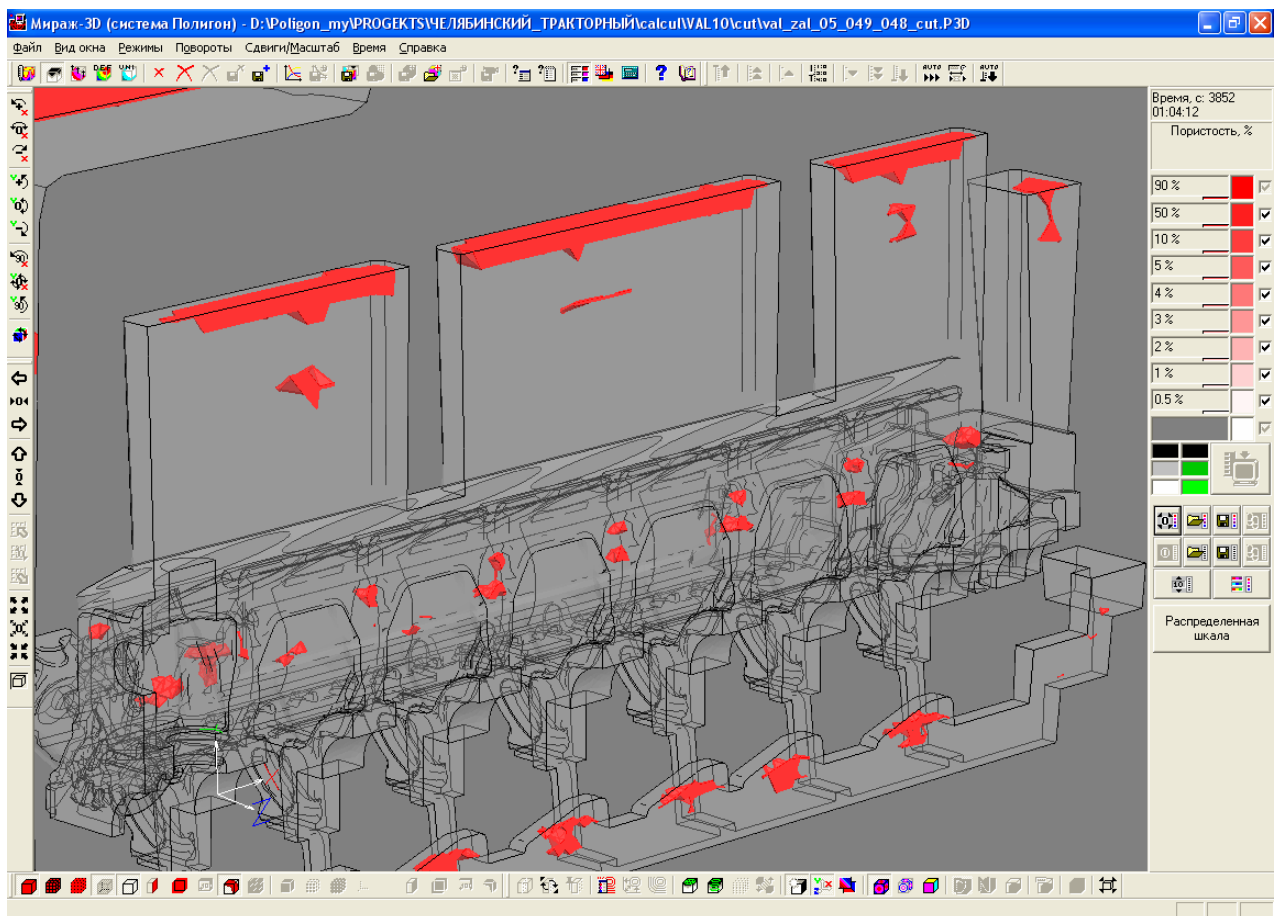


Рис. 4.15. Исоповерхность прикращения питания (120-ая секунда затвердевания).



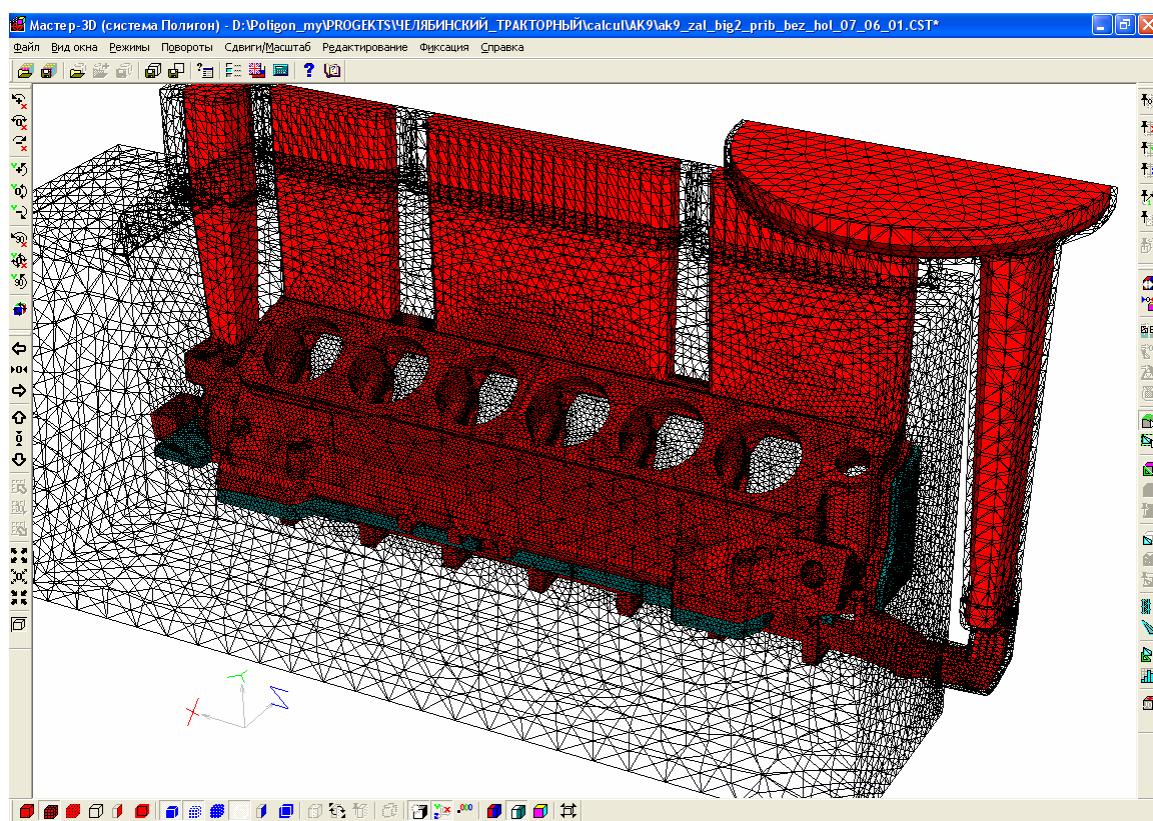
4.16. Усадочные раковины в отливке из сплава ВАЛ10.

5. Откорректированная базовая технология

В связи с тем, что как показало моделирование, изготовления отливки по базовой технологии и для сплава АК9ч, и для сплава ВАЛ10 питание прибылями силовых перегородок недостаточно, было принято решение исследовать технологию, незначительно отличающуюся от базовой. Было проведено два изменения:

- а) увеличена высота прибылей на 100 мм,
- б) убраны холодильники на плоскостях под рубашки цилиндров.

Геометрическая модель, разбитая на конечные элементы, показана на рис. 5.1

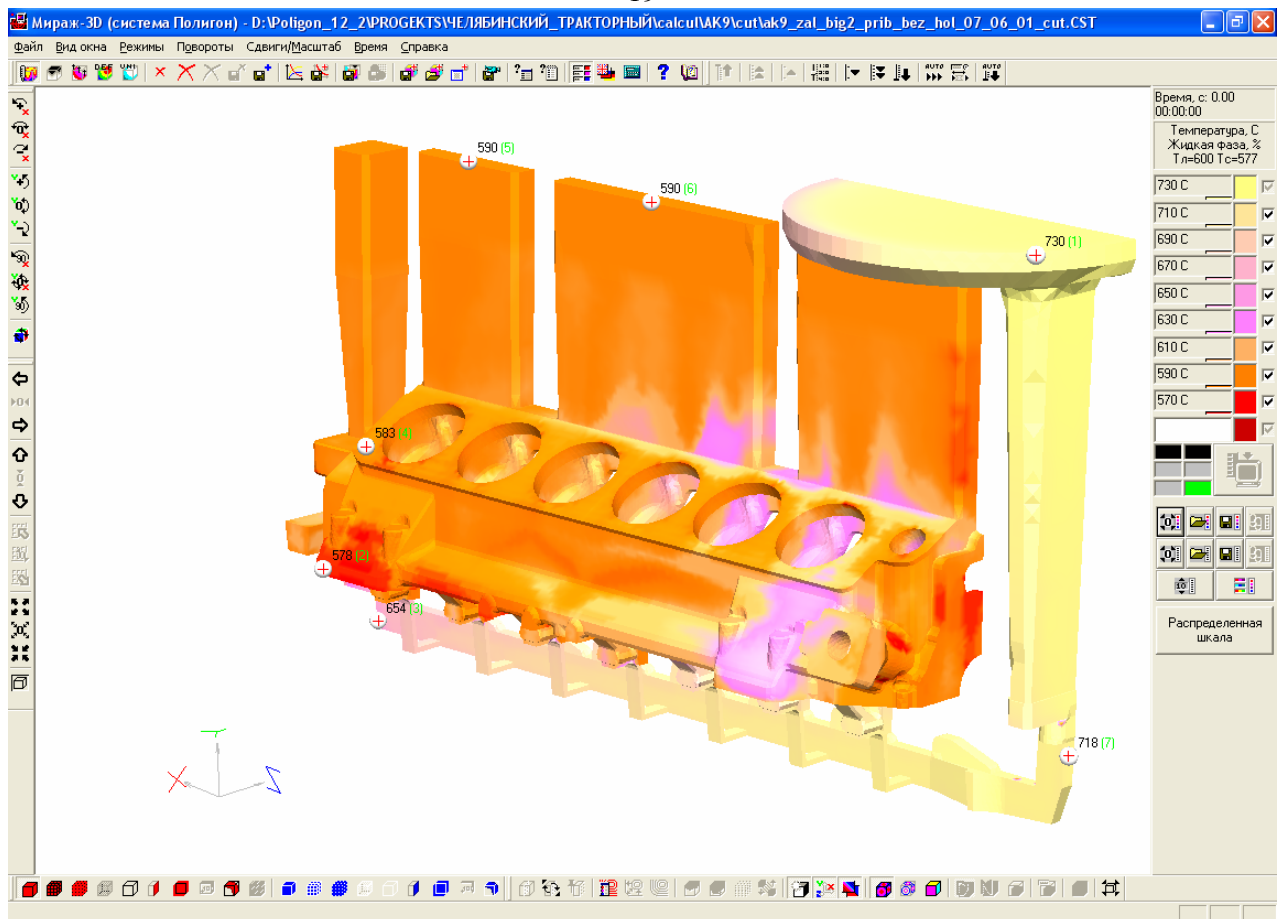


5.1. Геометрическая модель, разбитая на конечные элементы

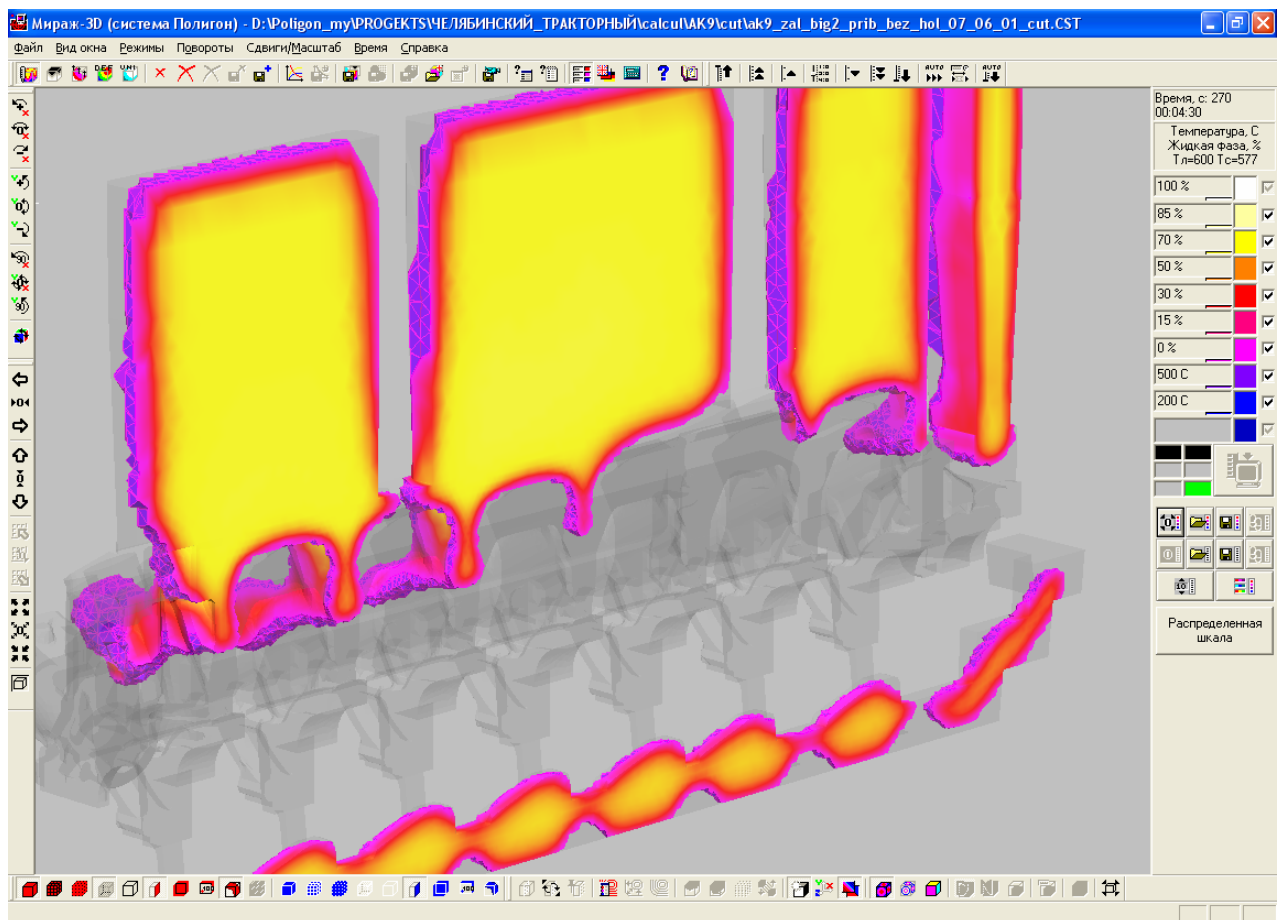
5.1 Сплав АК9ч

В динамике заливки сплава АЛ9ч с изменением технологии существенных изменений не произошло, поэтому иллюстрации этапов заполнения в отчете не приводятся. Следует только отметить, что в верхней зоне прибылей на заливки (начало затвердевания) температура металла стала 590°C (рис. 5.2), что естественно, т.к. высота прибылей увеличена на 100 мм.

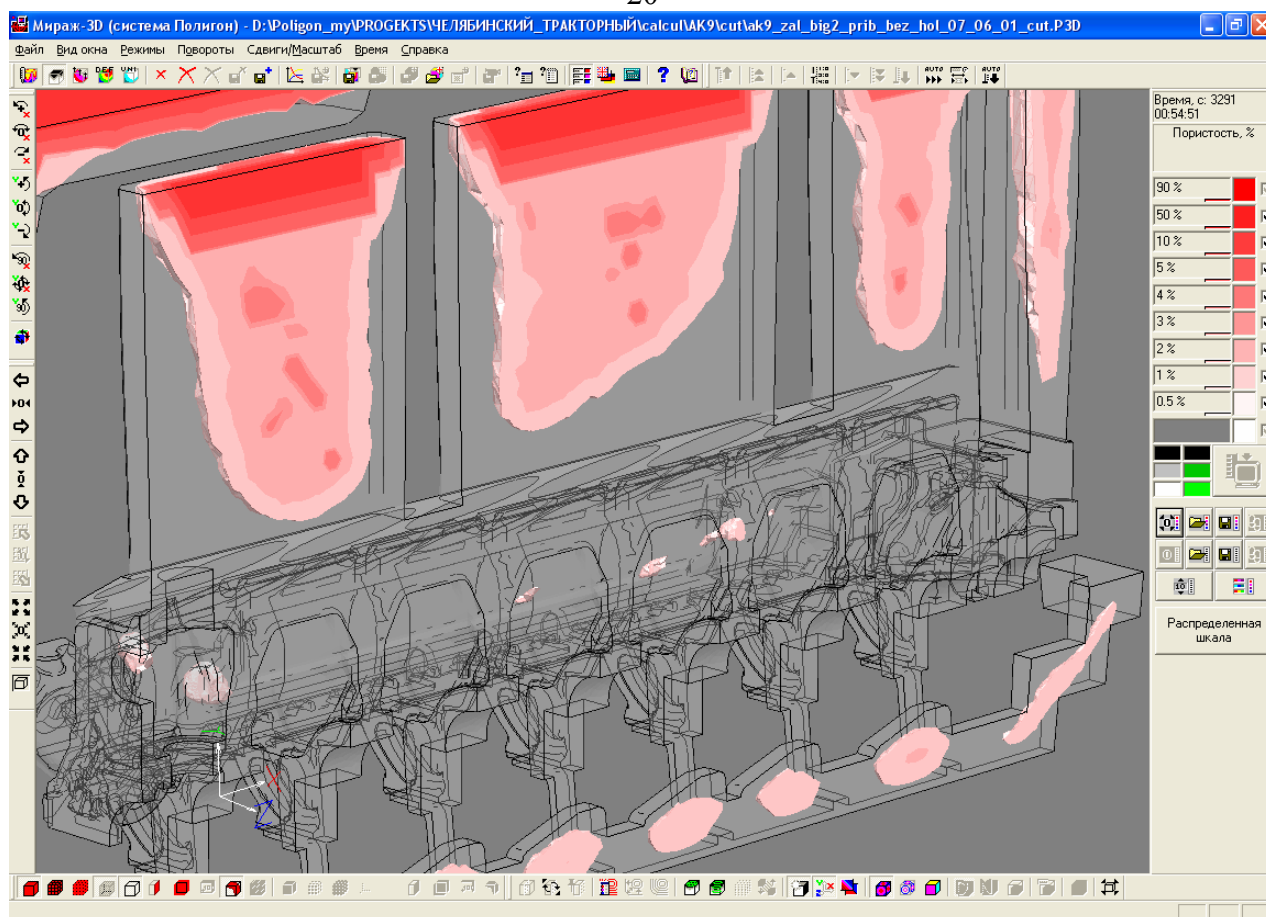
На последних этапах затвердевания отливки (270-я секунда) изоповерхность солидус (рис. 5.3) располагается гораздо благоприятней – тепловые узлы не отсекаются от питания прибылями. Соответственно и количество зон, пораженных пористостью до 2%, заметно уменьшилось (сравнить рис. 5.4 с рис. 4.12).



5.2. Распределение температур металла на момент окончания заливки.



5.3. Исоповерхность солидус на 270-й секунде затвердевания.



5.4. Участки отливки, имеющие пористость до 2% («мягкие условия питания»)

5.2 Сплав ВАЛ10

Что касается сплава ВАЛ10, то внесенные изменения в технологию практически никак не повлияли на качество отливки. На 120-ой секунде при затвердевании также произошел отрыв тепловых узлов от питания прибылями, а расположение, количество и объем раковин остался тем же, что и при изготовлении отливки по базовой технологии.

6. Новая технология

Для повышения качества отливки при изготовлении его из сплава АЛ9ч, а также для изучения возможности изготовления этой детали из сплава ВАЛ10 методами моделирования исследовали новую технологию, содержание которой заключается в следующем:

- а) убраны 3 прибыли на плоскости над топливным насосом и на их место установлены холодильники толщиной 20 мм;
- б) на плоскостях под рубашку цилиндров убраны холодильники и установлено 14 прибылей над каждой силовой перегородкой;
- в) высота прибылей принята соответствующая опоке верха высотой 550 мм.

Геометрическая модель, разбитая на конечные элементы, показана на рис. 6.1.

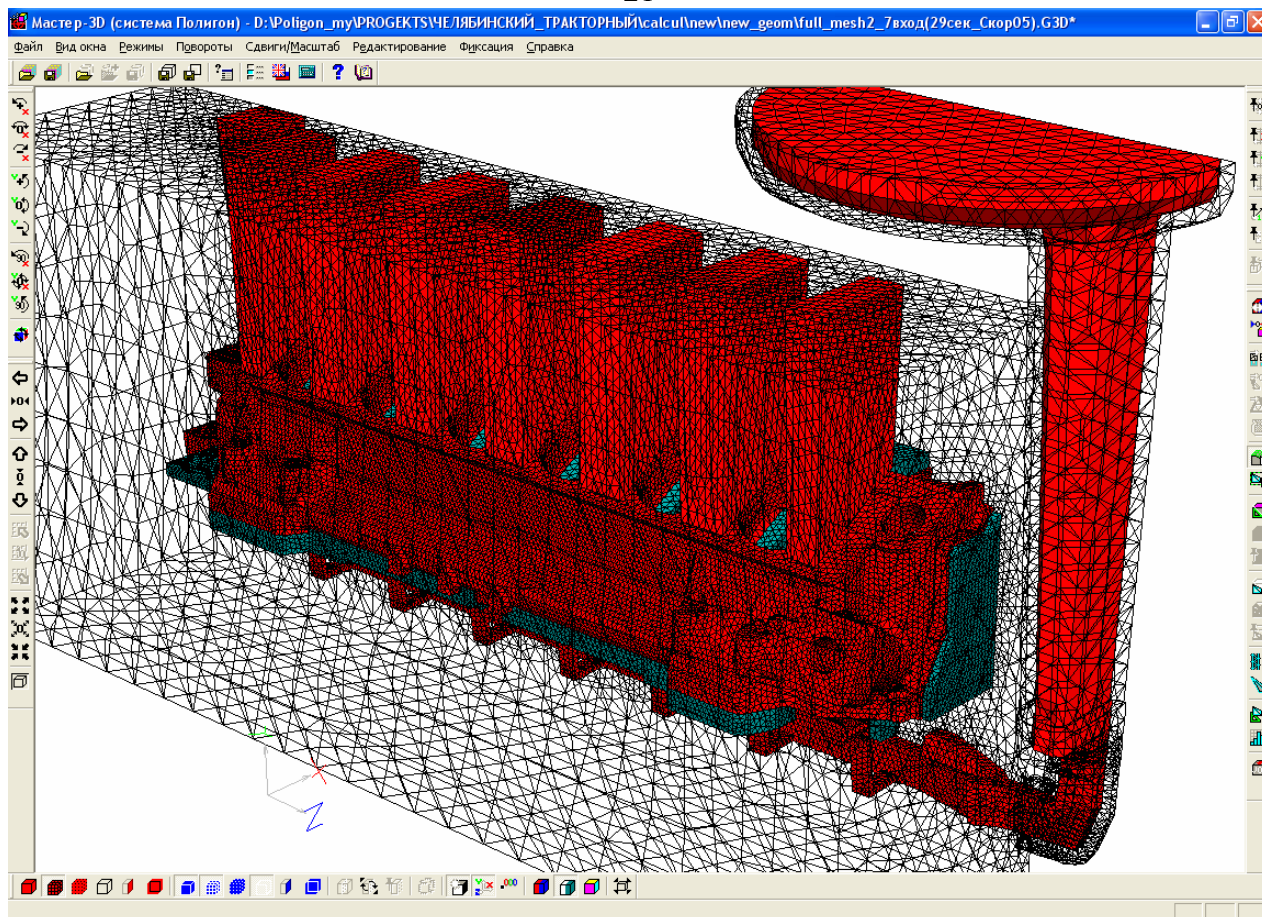


Рис. 6.1. Геометрическая модель, разбитая на конечные элементы

6.1 Сплав АК9ч

Динамика заливки показана на рис.6.2-6.4. Изменения в динамике заливки заключаются в сокращении на 5 секунд продолжительности заливки и в увеличении температуры металла до $622-641^{\circ}\text{C}$ в первых от стояка шести прибылях (рис. 6.4).

При времени затвердевания 270 секунд, изоповерхность солидус фактически выходит из отливки в прибыли (рис. 6.5), что свидетельствует о вполне удовлетворительном питании тепловых узлов прибылями. Такая организация питания обеспечивает получение отливки с областями пористости до 2%, (рис. 6.6) которые гораздо менее распространены в теле отливки, чем по базовой технологии (сравнить рис. 6.6 с рис.4.12). Проведение моделирования при «жестких условиях питания» (рис. 6.7) показало, что могут присутствовать очень незначительные области с пористостью до 5%, занимающие также гораздо меньший объем, чем по базовой технологии (сравнить рис. 6.7 с рис.4.13).

Исследовали возможность изготовления отливки по новой технологии при затвердевании при атмосферном давлении, т.е. без автоклава. Убедительно показано (сравнить рис. 6.8 с рис. 6.6), что избыточное давление при затвердевании абсолютно необходимо для получения здоровой отливки. При «жестких условиях питания» при атмосферном давлении также наблюдаются незначительные области с пористостью объемом до 5% (рис. 6.9).

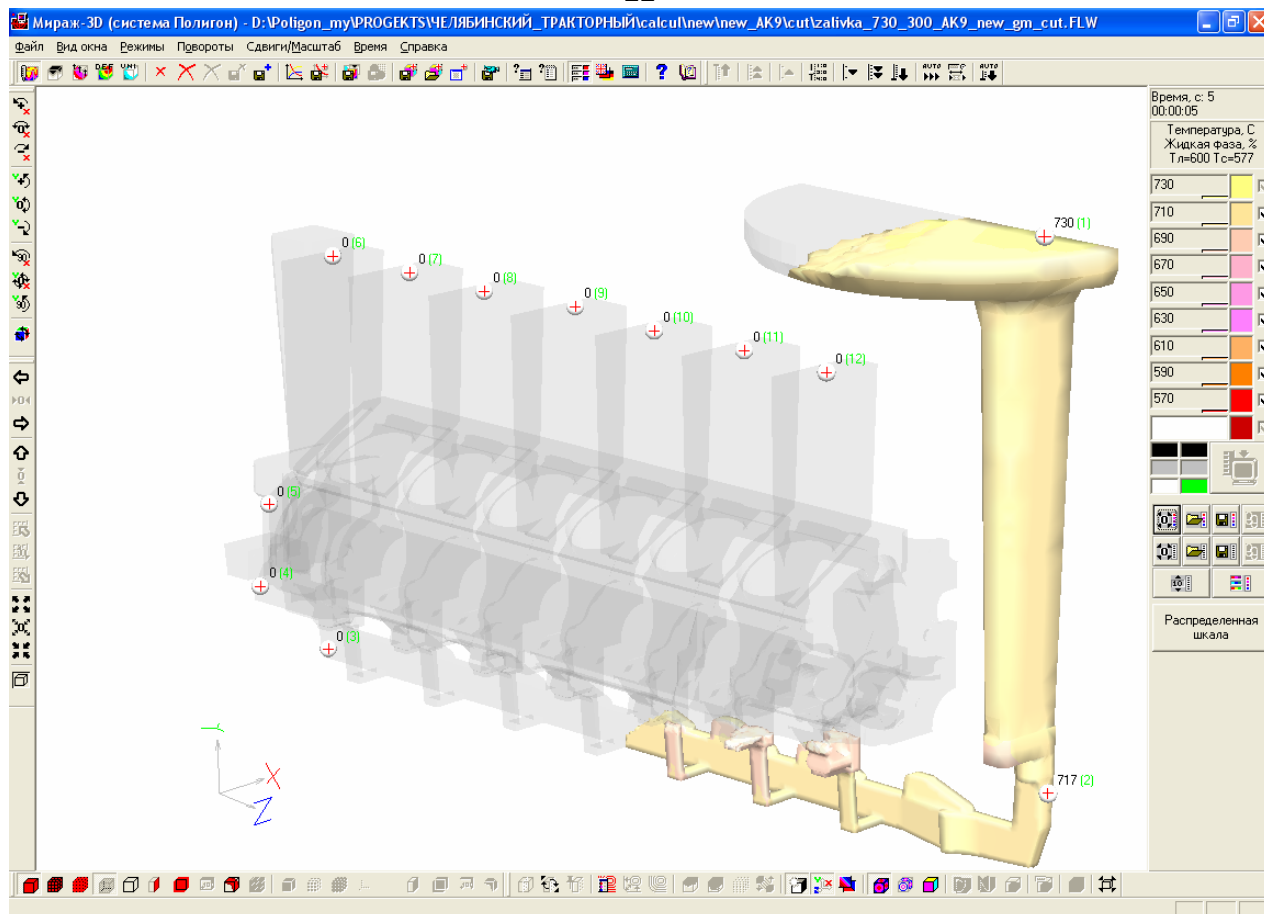


Рис. 6.2. Заливка сплава АК9ч, 5-я сек.

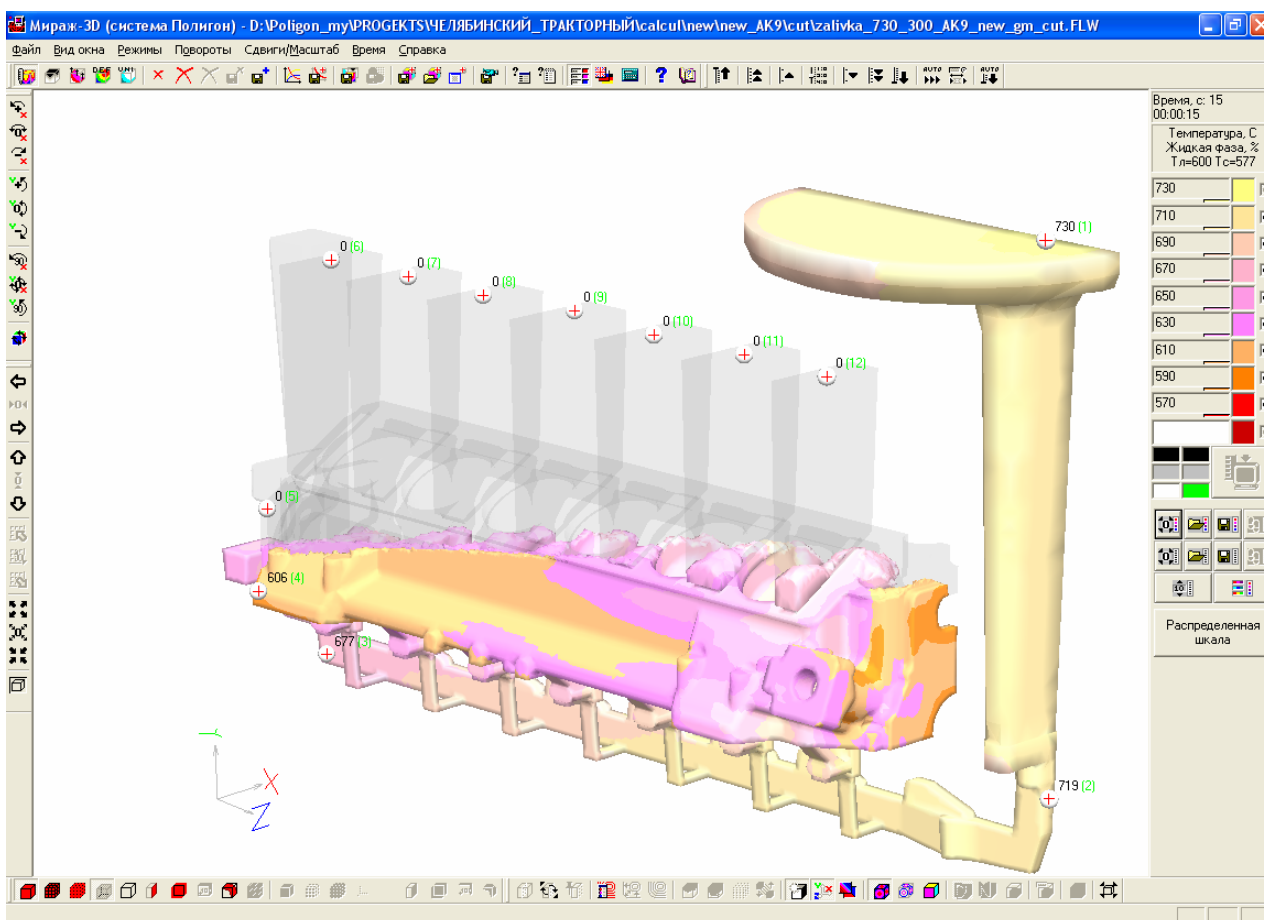


Рис. 6.3. Заливка сплава АК9ч, 15-ая сек.

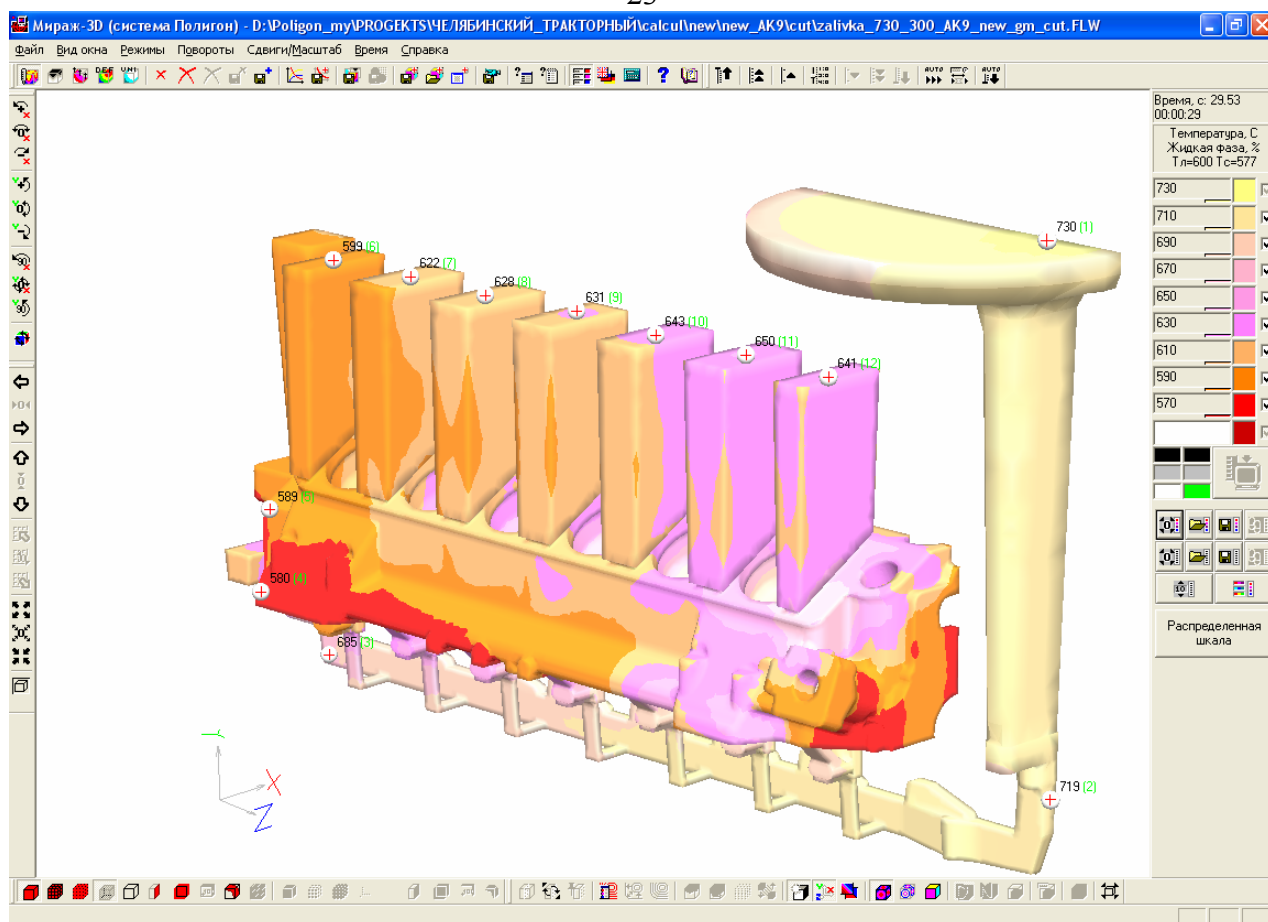
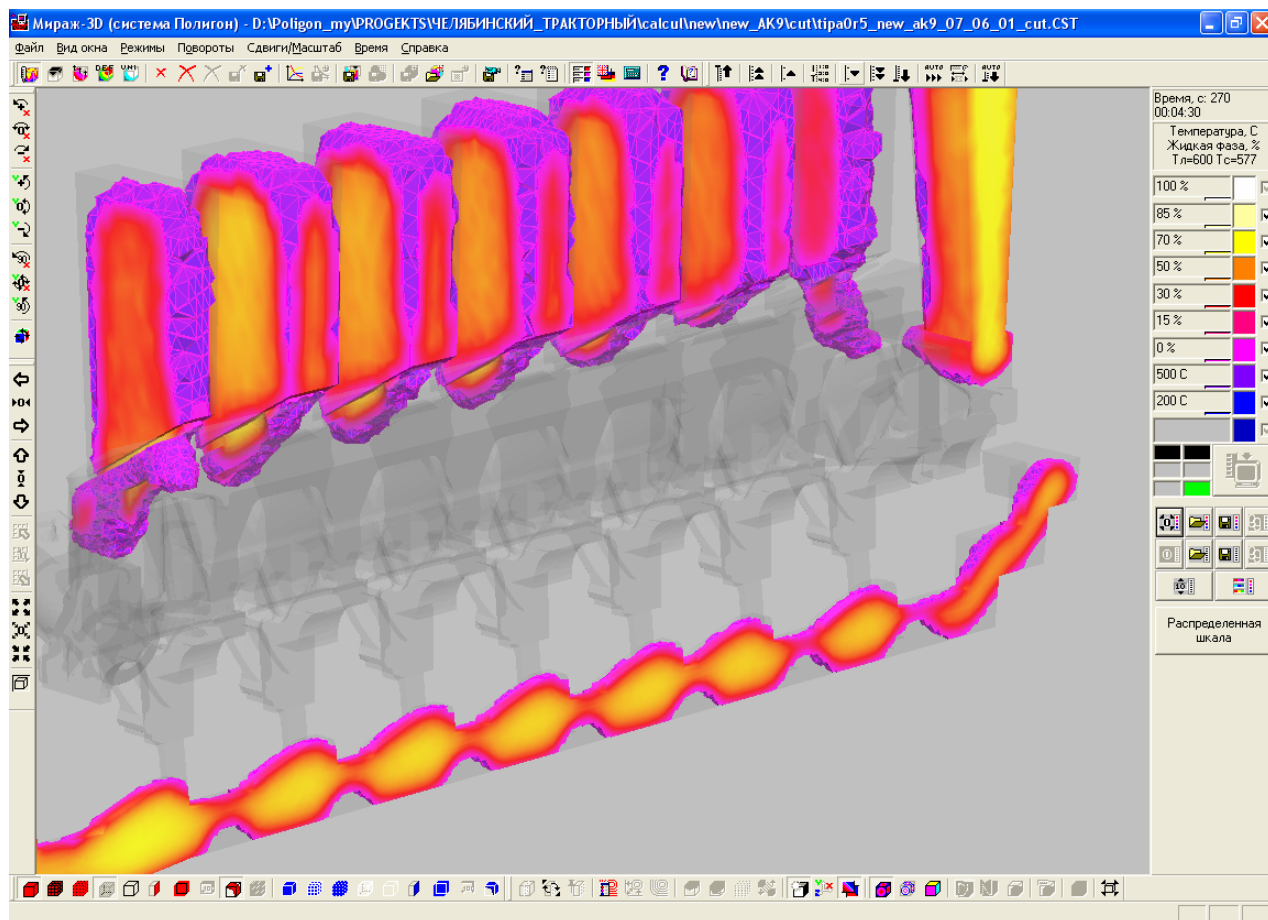


Рис. 6.4. Заливка сплава АК9ч, 30-ая сек.



6.5. Изоповерхность солидус на 270-ой секунде затвердевания

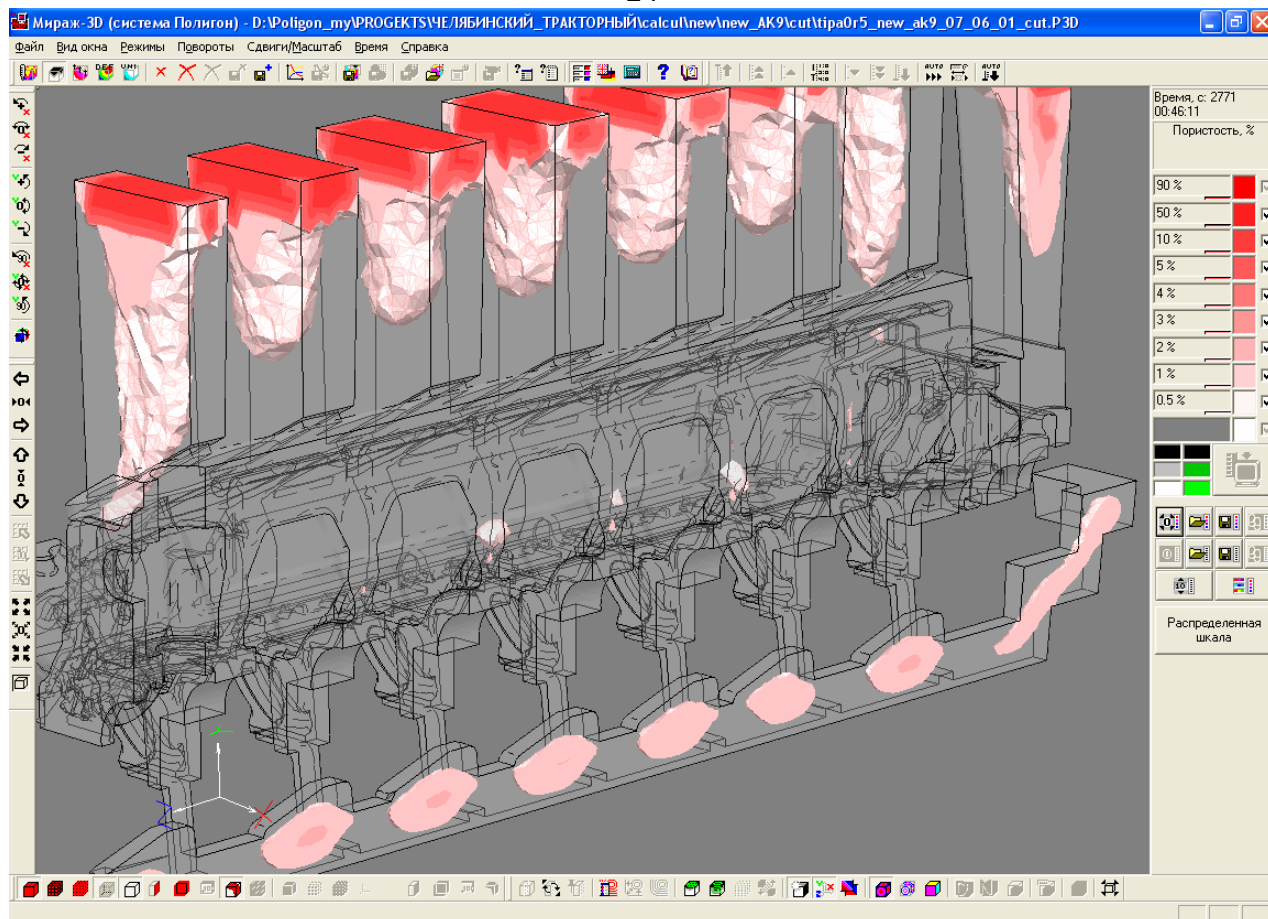


Рис. 6.6. Зоны отливки с пористостью 2 % («мягкие условия питания»).

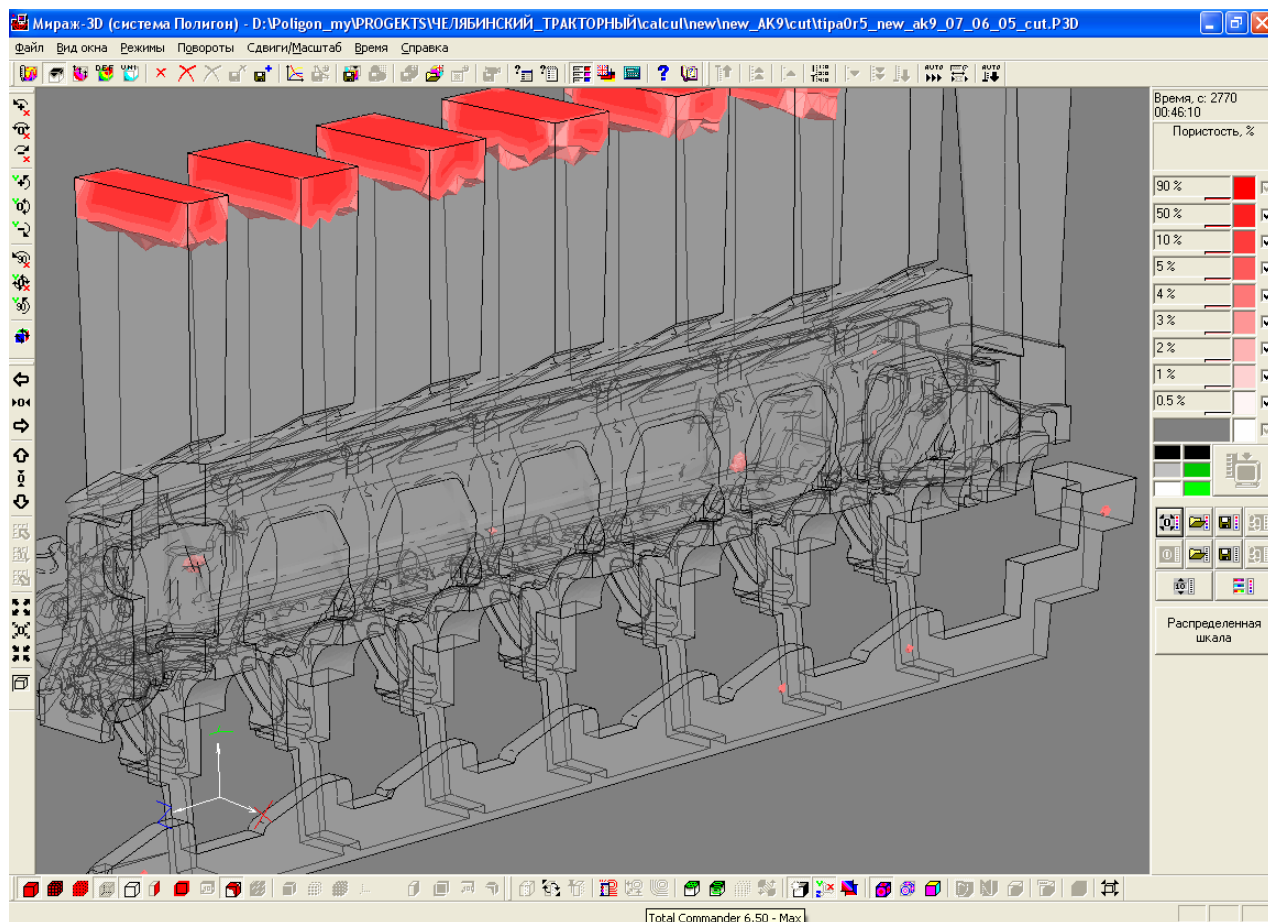


Рис. 6.7. Зоны отливки с пористостью 5 % («жесткие условия питания»).

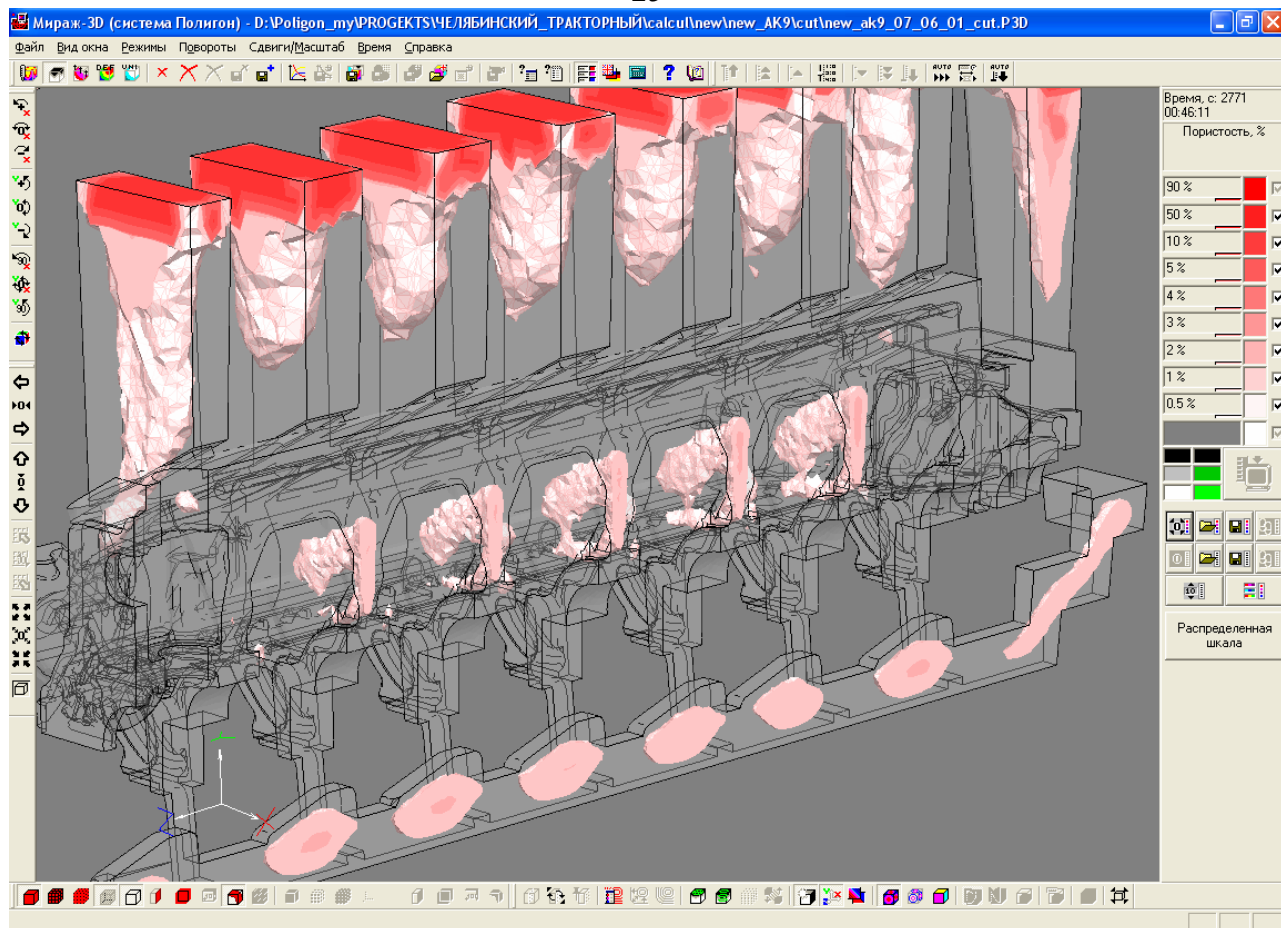


Рис. 6.8. Зоны отливки с пористостью 2 % («мягкие условия питания») без избыточного давления.

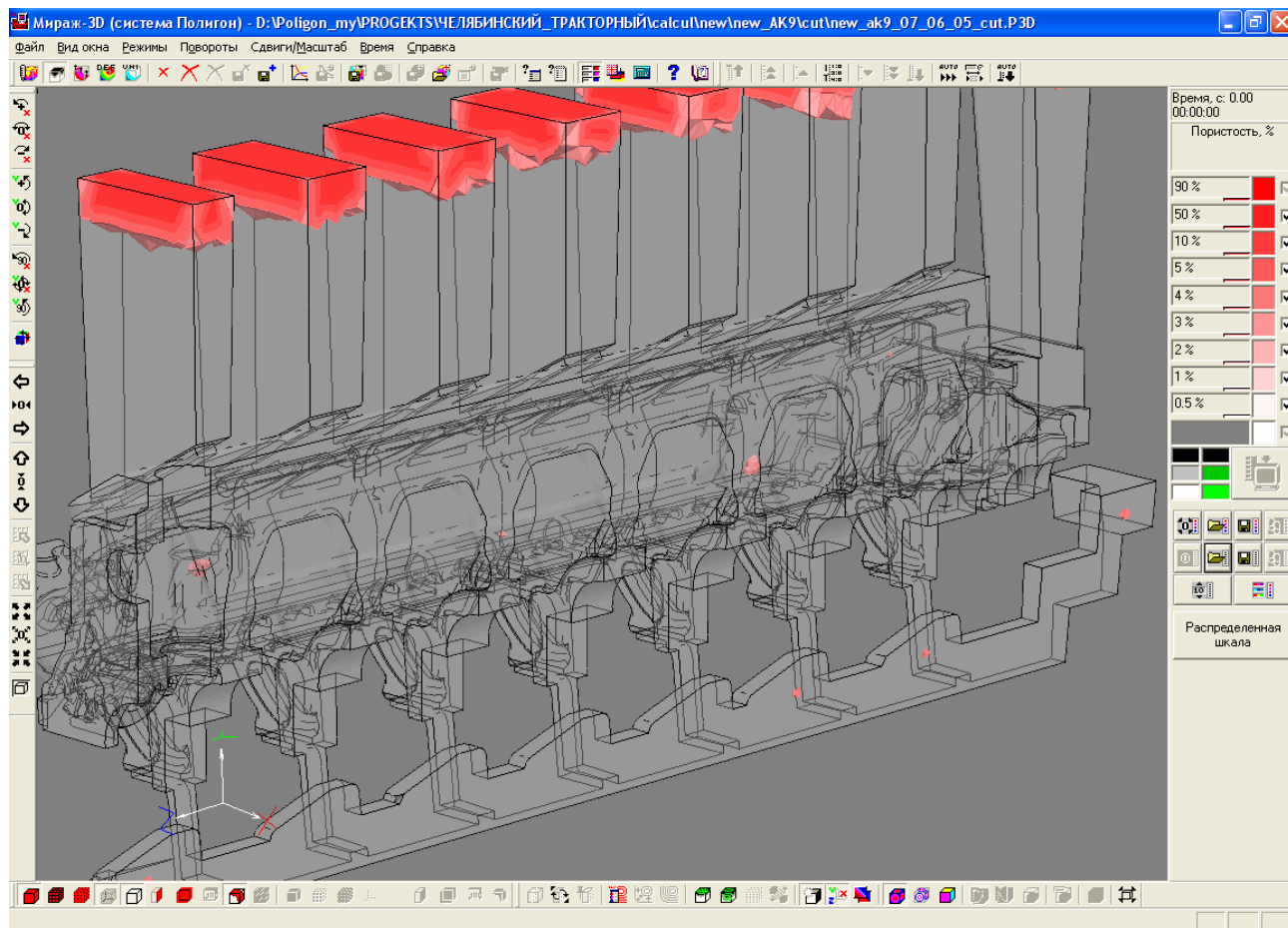


Рис. 6.9. Зоны отливки с пористостью 5 % («жесткие условия питания») без избыточного давления.

6.2 Сплав ВАЛ10

Изменение технологии также привело к некоторому повышению температуры металла в прибылях (до 650-670 °С) на конец заливки детали из сплава ВАЛ10 (рис. 6.10). Однако это не привело к улучшению условий питания тепловых узлов (рис. 6.11), уже на 70-й секунде прекращается питание от прибылей тепловых узлов.

Конфигурация и размещение раковин несколько изменяется (рис. 6.12), но в изготовленной отливке по новой технологии из сплава ВАЛ10 в силовых перегородках всё равно сохраняются раковины.

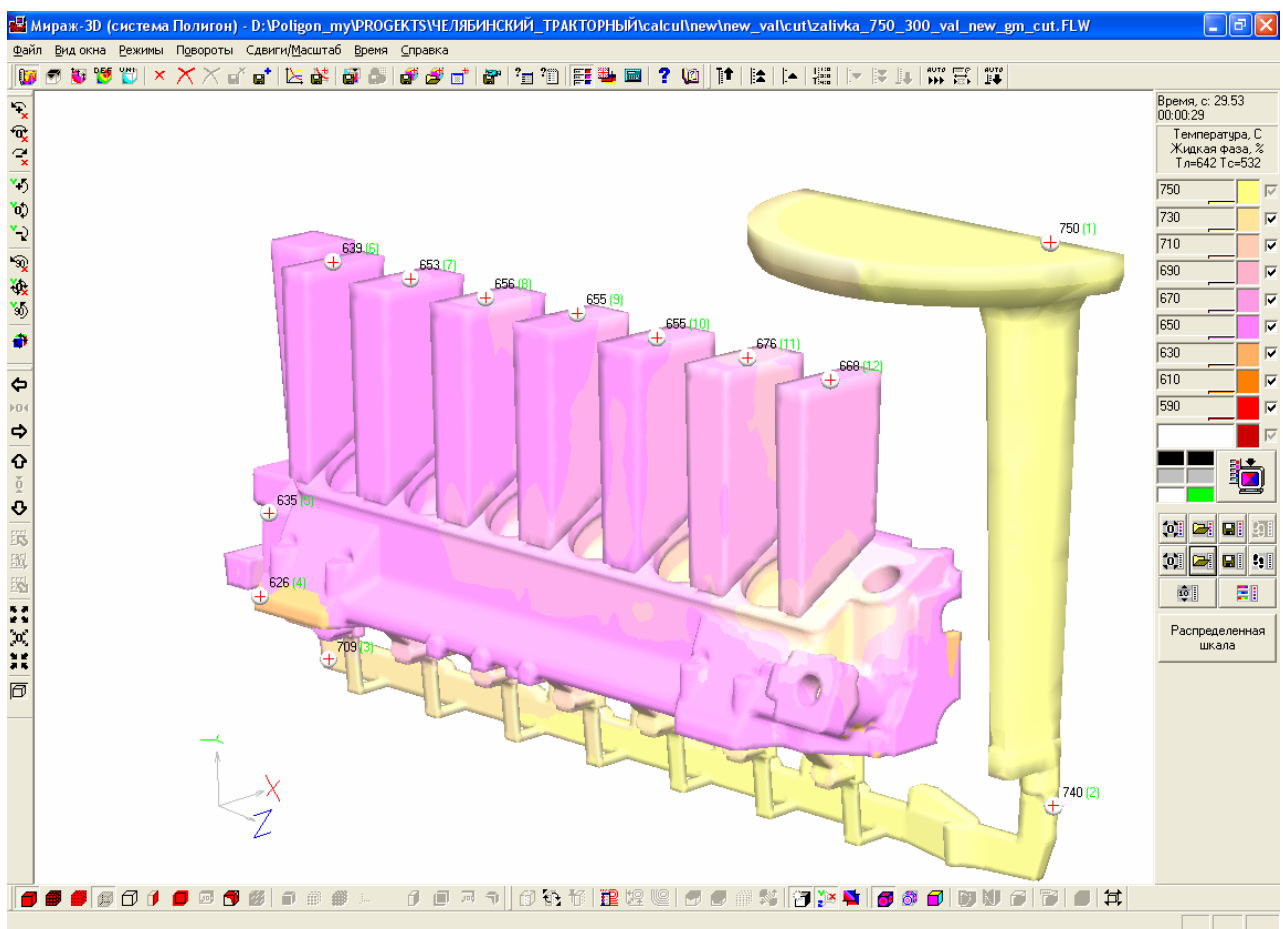


Рис. 6.10. Распределение температур в отливке на момент окончания заливки.

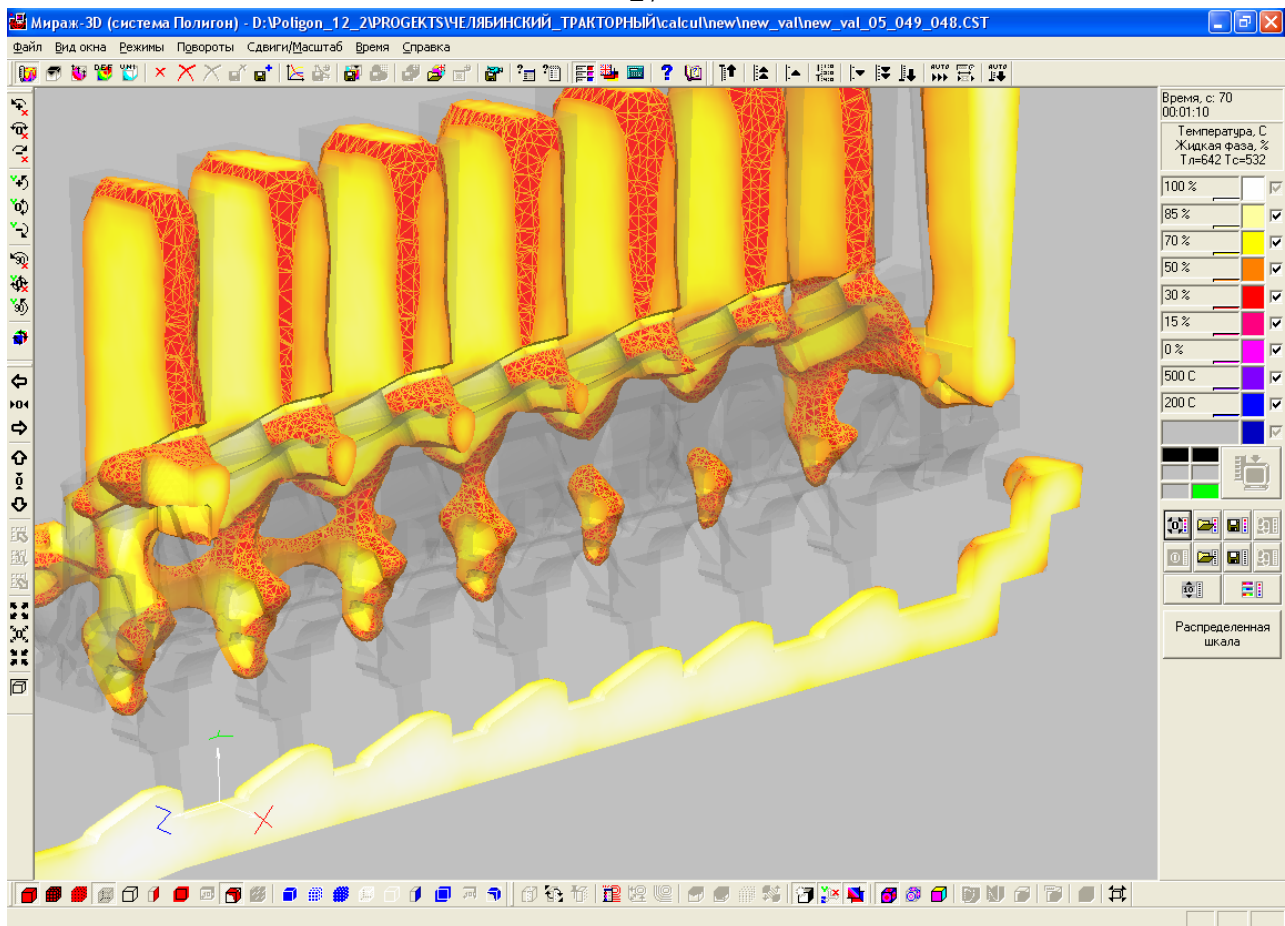


Рис. 6.11 Изолинии солидус на 70-ой секунде затвердевания

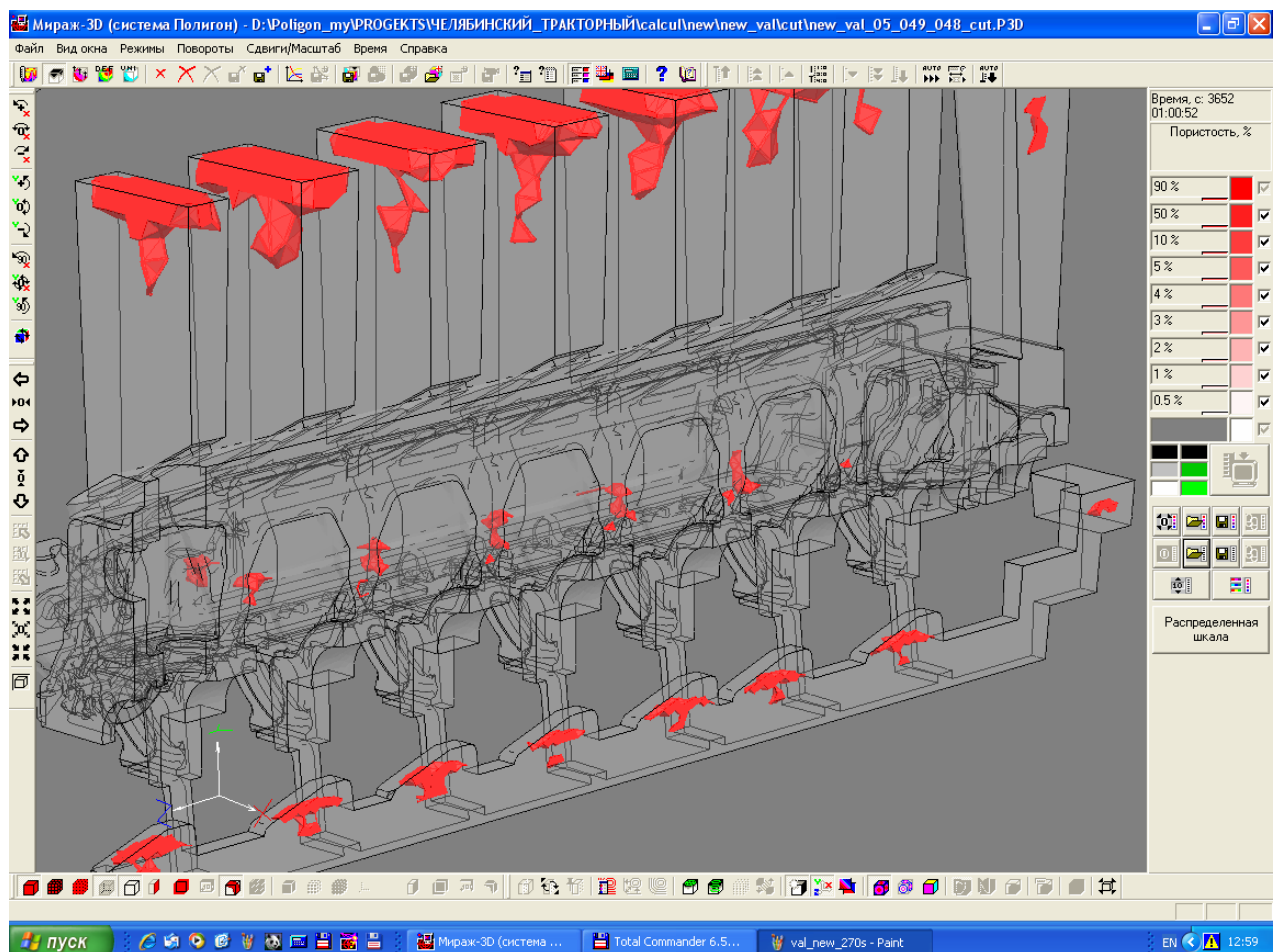


Рис. 6.12 Усадочные раковины в отливке из сплава ВАЛ10

7. Выводы и рекомендации

Проведенное моделирование процесса изготовления отливки из сплавов АК9ч и ВАЛ10 по различным вариантам технологии дает основание сделать следующие **выводы**:

1. Изготовление по технологии с 14-ю прибылями над каждой силовой перегородкой дает возможность получить отливку из сплава АК9ч с минимальным количеством (2-3) участков пористости, не превышающей 2% в местах её расположения.
2. При изготовлении из сплава ВАЛ10 по любой из исследованных технологий отливка поражена раковинами.

Рекомендации:

При изготовлении отливки «из сплава АК9ч рекомендуется:

- а) убрать 3 прибыли на плоскости над топливным насосом и на из место установить холодильники толщиной 20 мм;
- б) на плоскостях под рубашку цилиндров убрать холодильники и установить 14 прибылей над каждой силовой перегородкой;
- в) высота прибылей принять соответствующей опоке верха высотой 550 мм.

Изготовить отливку исследованной конструкции из сплава ВАЛ10 без раковин в зоне силовых перегородок, по-видимому, не представляется возможным.