

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования «Самарский национальный исследовательский  
университет имени академика С.П. Королева»  
(Самарский университет)

Институт двигателей и энергетических установок  
Кафедра технологий производства двигателей

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

**«ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГТД НА БАЗЕ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ»**

по направлению подготовки 24.04.05 Высокотехнологичное  
инновационное машиностроительное производство  
(уровень магистра)

направленность (профиль) «Двигатели летательных аппаратов»

Обучающийся \_\_\_\_\_ (Беляев М. В.)

Руководитель ВКР, \_\_\_\_\_ к.т.н., доцент кафедры ТПД (Вдовин Р. А.)

Нормоконтролер \_\_\_\_\_ (Вдовин Р. А.)

Самара 2020

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»  
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)  
Кафедра технологии производства двигателей

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ / Хаймович А.И. /  
(подпись) И.О.Фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**Задание на выпускную квалификационную работу (ВКР)**

Обучающемуся Беляеву Михаилу Васильевичу

Группы 2221-240405D

1.Тема ВКР: исследование параметров технологического процесса литья лопаток турбины ГТД на базе использования цифровых моделей

утверждена приказом по университету от « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. № \_\_\_\_

2.Перечень вопросов, подлежащих разработке в ВКР: исследование технологического процесса литья соплового аппарата турбины ГТД, разработка модернизированного технологического процесса литья соплового аппарата с использованием компьютерного моделирования, разработка технологического процесса изготовления отливок соплового аппарата турбины ГТД с использованием технологии быстрого прототипирования, оценка экономической эффективности изготовления восковых моделей сопловых аппаратов турбины при помощи технологии быстрого прототипирования

4.Дата выдачи задания: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

5.Срок представления на кафедру законченной ВКР « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Руководитель ВКР

\_\_\_\_\_ / Вдовин Р.А. /  
должность, степень И.О.Фамилия

Задание принял к исполнению

\_\_\_\_\_ / Беляев М.В. /  
И.О.Фамилия обучающегося

## РЕФЕРАТ

Пояснительная записка: 105 с., 53 рис., 7 табл., 3 приложения, 62 источника.

ГАЗОТУРБИННЫЕ ДВИГАТЕЛИ, ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО, СОПЛОВЫЕ АППАРАТЫ ТУРБИНЫ, АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ВОСКОВЫЕ МОДЕЛИ, БЫСТРОЕ ПРОТОТИПИРОВАНИЕ

Объект исследования – сопловой аппарат турбины газотурбинного двигателя.

Предмет исследования – технологический процесс изготовления отливок детали «Сопловой аппарат».

Цель работы – разработать технологический процесс литейного производства сопловых аппаратов турбины с применением аддитивных технологий и компьютерного моделирования для получения годных, экономически выгодных отливок в условиях мелкосерийного или опытного производства.

В процессе работы были решены следующие задачи:

- 1) разработан маршрут для опытного производства отливок соплового аппарата турбины ГТД с применением аддитивных технологий производства мастер-моделей;
- 2) произведен расчет в системе компьютерного моделирования литейных процессов ProCast;
- 3) произведен сравнительный анализ себестоимости изготовления отливок соплового аппарата турбины с применением аддитивных технологий и изготовление по традиционной технологии.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ГТД.....	9
1.1 Анализ традиционной технологии изготовления соплового аппарата турбины.....	9
1.2 Технологический процесс литья по выплавляемым моделям отливки детали «Соловой аппарат» .....	15
1.3 Анализ систем компьютерного моделирования литейных процессов....	18
1.4 Выводы по главе.....	21
2. РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ СОПЛОВОГО АППАРАТА ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	23
2.1 Расчет процесса литья и кристаллизации отливки соплового аппарата турбины ГТД.....	24
2.1.1 Построение объёмной модели литейного блока.....	24
2.1.2 Проектирование конечно-элементной модели отливки .....	26
2.1.3 Настройка параметров процесса расчета и запуск на расчёт .....	31
2.2 Анализ результата компьютерного моделирования базового процесса литья соплового аппарата.....	39
2.2.1 Анализ результатов гидродинамических расчетов, полученных с использованием СКМ ЛП ProCast;.....	39
2.2.3 Анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния отливки, полученных с использованием СКМ ЛП ProCast.....	46
2.2.4 Анализ расчетов зеренной структуры в отливке .....	49
2.3 Проектирование модернизированного технологического процесса .....	50
2.4 Выводы по главе.....	57
3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ГТД ПРИ ПОМОЩИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ.....	59

3.1 Сравнение методов аддитивных технологий .....	60
3.2 Применение технологии быстрого прототипирования в изготовлении восковок для литья сопловых аппаратов по выплавляемым моделям .....	66
3.2.1 Проектирование 3D модели для изготовления мастер-модели.....	69
3.2.2 Изготовление силиконовой формы и получение восковых моделей	74
3.3 Выводы к главе.....	77
4 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОСКОВЫХ МОДЕЛЕЙ СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ ТУРБИНЫ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ .....	79
4.1 Экономический расчет изготовления восковых моделей в условиях реализации аддитивного производства.....	79
4.1.1 Стоимость печати прототипа детали .....	79
4.1.2 Стоимость изготовления силиконовой формы .....	82
4.2 Экономический расчет изготовления восковых моделей с применением традиционной технологии изготовления.....	87
4.2.1 Стоимость изготовления металлической пресс-формы .....	87
4.3 Сравнительный анализ расчетов .....	91
4.4 Выводы по главе.....	93
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	95
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	103
ПРИЛОЖЕНИЕ В .....	105

## ВВЕДЕНИЕ

Современный газотурбинный двигатель (ГТД) – это комплекс инновационных конструкторских и технологических решений, направленных на достижение высоких показателей, которые характеризуют конструктивное совершенство двигателя. Наиболее значимыми параметрами силовой установки являются: удельная тяга, удельный расход топлива, затраты на техническую эксплуатацию и т. д.

Одним из решений задач, направленных на повышение данных показателей, является увеличение температуры газа перед турбиной. Турбина является наиболее нагруженной и сложной в конструкторском плане частью двигателя. Это обусловлено тяжёлыми условиями работы деталей горячего тракта:

- работа в агрессивных средах;
- высокие температуры;
- топлива, содержащие серу;
- работа в пылевлагонасыщенных районах, когда возможно попадание солей натрия и кальция.

Наибольшую нагрузку воспринимают на себя сопловые аппараты и рабочие сопловые аппараты первой ступени, так как температура газа имеет свое максимальное значение.

Помимо тяжелых условий работы, требующих применение особых сплавов и покрытий, сопловой аппарат ГТД имеют сложную пространственную геометрическую форму и высокие требования по точности изготовления. Жаропрочные металлы, применяемые при производстве, имеют низкий коэффициент обрабатываемости, что значительно усложняет процесс механической обработки и требует применения бесприпусковых технологий производства заготовок.

Наибольшее распространение получила технология литья по выплавляемым моделям. Так как данный метод позволяет производить

заготовки со сложной пространственной геометрией с высокой точностью, при наименьшем значении припуска, что значительно упрощает процесс механической обработки.

Однако данный метод не лишен ряда недостатков, наиболее значимыми из них являются: высокая стоимость отливок, и, несмотря на большой опыт использования технологии и значительные количество эмпирических данных, высокий процент брака (порядка 50%).

Данные особенности изготовления соплового аппарата турбины, делают их наиболее дорогостоящими деталями газотурбинного двигателя (20 - 35% от общей стоимости) и наиболее трудоёмкими в производстве (20 - 30% от общей трудоёмкости) [1 – 3].

Помимо затрат на серийное производство деталей значительный вклад в стоимость двигателя вносит опытное производство, так как приходится осуществлять несколько итераций конструкции и технологического процесса изготовления деталей в том числе и сопловых аппаратов турбины.

С целью сокращения затрат на опытное производство и снижения количества брака при литье сопловых аппаратов необходимо рассмотреть возможность применения компьютерного двойника технологического процесса литья по выплавляемым моделям детали «Сопловой аппарат первой ступени» [4].

Для достижения данной цели необходимо решить следующие задачи:

1. изучить технологический процесс литья детали «Сопловой аппарат первой ступени»;
2. спроектировать цифровой двойник технологического процесса и проанализировать его адекватность;
3. на основе полученных результатов разработать модернизированный технологический процесс и создать цифровой двойник;
4. провести сравнительный анализ и выбрать вариант с наименьшими дефектами.

Объектом исследования является заготовка соплового аппарата турбины ГТД первой ступени.

Предметом исследования является технологический процесс изготовления соплового аппарата турбины ГТД первой ступени.

Научной новизной работы является:

1. проектирование цифровой модели-двойника технологического процесса литья соплового аппарата, отличающейся от существующих аналогов возможностью моделирования взаимосвязанных задач напряженно-деформированного состояния и пористости в отливке;

2. прогнозирование усадки, образования пористости, при помощи моделирования, а также оценка эффективности литниково-питающей системы;

3. исследование влияния геометрических параметров литниково-питающей системы на качество отливки.

По теме выпускной работы магистра опубликованы: 4 статьи в периодических изданиях, одна из них имеет цитирование в РИЦ.



# 1 ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ГТД

Изготовление соплового аппарата турбины ГТД является трудоёмким и дорогостоящим процессом, а их число в современном двигателе варьируется в пределах 2 - 3,5 тысяч штук. Изготовление сопловых аппаратов, в связи с высокими требованиями точности сложнопрофильной поверхности пера и плохой обрабатываемостью материалов, вызывает ряд технологических проблем. Поэтому необходимо на этапе заготовительного производства обеспечивать высокую точность и минимизировать количество механической обработки.

С данной задачей наилучшим образом справляется технология литья по выплавляемым моделям. Этот метод позволяет получать бесприпусковые заготовки по перу сопловые аппараты и обеспечивать высокую точность. Однако, отсутствие полных данных о процессах заливки керамической формы и кристаллизации, а также доводочные операции технологии литья отливки методом «проб и ошибок» приводит к высокому количеству брака (50%).

Появление компьютерных систем цифрового моделирования технологии литья позволяет в полной мере оценить весь процесс получения отливки. Что позволяет сократить количество брака и значительно уменьшить затраты на доводку.

## 1.1 Анализ традиционной технологии изготовления соплового аппарата турбины

По назначению сопловые аппараты газотурбинного двигателя различают на: рабочие, направляющие, спрямляющие и сопловые. В зависимости от назначения и условий работы сопловой аппарат изготавливают следующим образом:

- горячая штамповка;

- прессование;
- прокатка;
- литьё с направленной кристаллизацией;
- сваркой [1,3].

В работе рассматривается технологический процесс изготовления соплового аппарата турбины первой ступени (рисунок 1.1).

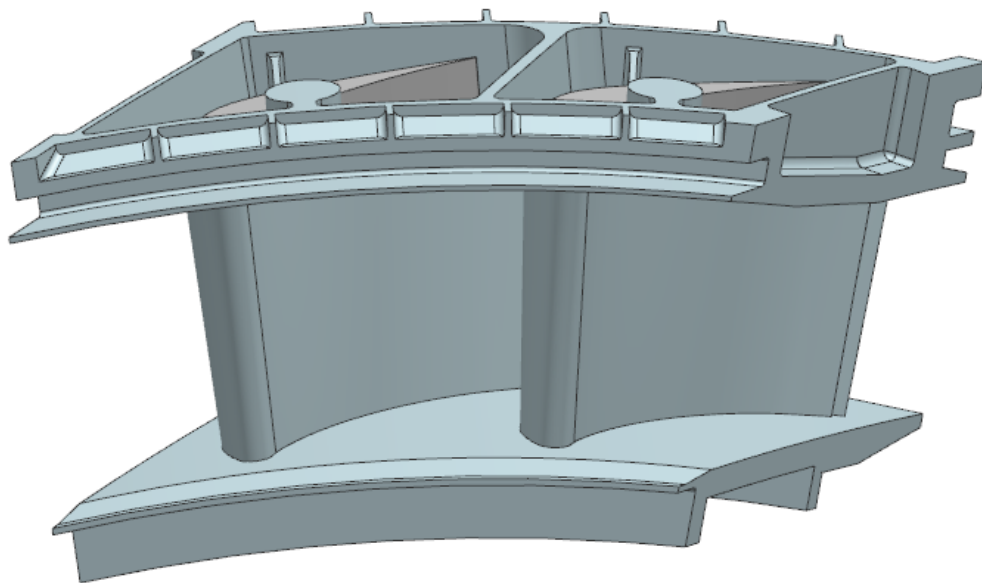


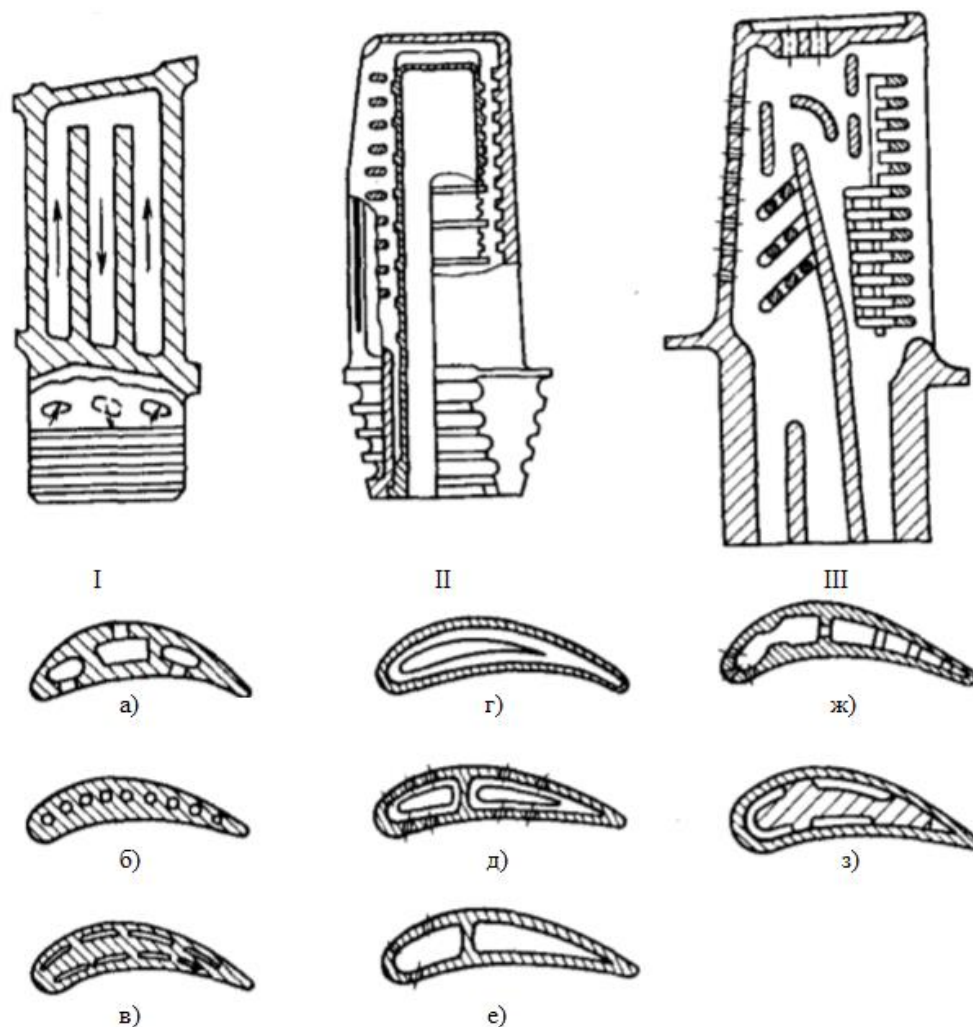
Рисунок 1.1 – 3D модель соплового аппарата I - й ступени турбины ГТД

Так же сопловые аппараты можно разделить на охлаждаемые и не охлаждаемые. Охлаждаемые сопловые аппараты бывают следующих видов: многоканальные (рисунок 1.2а), дефлекторные (рисунок 1.2б), перфорированные (рисунок 1.2в) и с пористой оболочкой (рисунок 1.2г).

Основными конструктивными элементами сопловых аппаратов ГТД являются перо и, в зависимости от назначения, хвостовик или замок, в данном случае сопловой аппарат в роли корневой части имеет хвостовик. Перо сопловые аппараты имеет сложно профильную геометрию, которую принято называть следующим образом: выпуклую сторону пера – спинкой, а вогнутую

– пером. Кромку пера со стороны подвода газа называют входной или передней, а противоположенную – выходной или задней.

Перо соплового аппарата турбины имеет сечения постоянные, или изменяющиеся по длине сопловые аппараты, с углом закрутки до  $10^\circ$ .



I – многоканальные (а, б, в); II – дефлекторные (г, д); III – бездефлекторные с перфорацией (е, ж) и с пористой оболочкой (з)

Рисунок 1.2 – Виды охлаждаемых сопловых аппаратов турбин

Рабочие лопатки в зависимости от условий работы имеют следующие типы замков (рисунок 1.3): ёлочные, типа «ласточкин хвост», шарнирный (вильчатый). Ёлочный замок получил наиболее распространение среди рабочих сопловых аппаратов турбин, так как в таком типе конструкции возможно создание каналов для подвода или отвода воздуха, который

охлаждает рабочие сопловые аппараты турбины 1-й и, в некоторых случаях, 2-й и 3-й ступеней. Замки типа «ласточкин хвост» и шарнирные чаще используются для рабочих сопловых аппаратов компрессора.

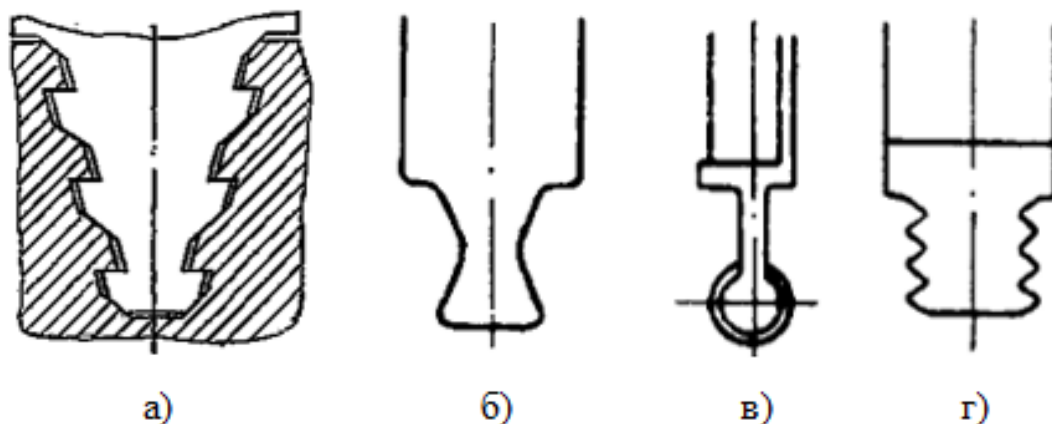


Рисунок 1.3 – Основные виды замков сопловых аппаратов турбины

Замки сопловых аппаратов имеют более простую геометрию, полки прямоугольного или косоугольного контура с цапфой или без нее. Полки замков наиболее часто имеют развитые элементы для крепления в наружном и внутреннем кольцах.

Сопловые аппараты турбины работают в условиях высоких напряжений, агрессивной среды продуктов сгорания при высоких температурах, достигающих до 1600К [7]. В тоже время газовый поток оказывает механическое воздействие на поверхностный слой пера сопловых аппаратов, что в совокупности с химическим воздействием, вызывает коррозионное и эрозионное разрушения.

В связи с этим, к материалам соплового аппарата турбины ГТД предъявляют высокие требования с широким интервалом физико-химических свойств [2]. Материалы, применяемы при изготовлении сопловых аппаратов, должны обладать следующими характеристиками:

1. высоким сопротивлением: ползучести, усталости, высокотемпературной газовой коррозии и эрозионному разрушению;

2. иметь малую чувствительность к надрезам (концентраторам напряжений) и в тоже время обладать определенными технологическими свойствами;

3. обеспечивать обрабатываемость резанием, давлением, свариваемостью

4. иметь хорошие литейные свойства.

В основном используют литейные сплавы, так как они являются наиболее жаропрочные и жаростойкие относительно деформируемых. В настоящее время применяют жаропрочные сплавы на никель-хромовой и никель-хром-кобальтовой основе, легированных Ti, Al, Mo, W, Nb, V, Y, Hf, Re, Ta и др.

Для изготовления сопловых аппаратов турбины ГТД применяют следующие жаропрочные литейные сплавы: ЖС6К, ЖС6У, ВЖЛ-12У и др. при температуре нагрева 950...1000 °С, и ЖС6УВИ, ЖС6Ф, ЖС26ВИ, ЖС30, ЖС32 и др. при 1050...1100 °С.

В будущем для изготовления сопловых аппаратов турбины рассматриваются тугоплавкие металлы и их сплавы: Ta, Cr, W, Nb и др., в том числе керамика.

В настоящее время, единственным методом литья, с помощью которого можно получать высокоточные заготовки с требуемой шероховатостью, после которого трактовые поверхности заготовки не нуждаются в обработке, и при этом считается наиболее экономичным в промышленном масштабе, является метод литья по выплавляемым моделям (в оболочковые формы).

Основными технологическими требованиями к конструкции литого соплового аппарата и заготовке, для обеспечения высокого качества изделия, сводятся к следующим пунктам:

1. во избежание коробления пера соплового аппарата и образования рыхлот и раковин, рекомендуется неохлаждаемые сопловые аппараты (монолитные) отливать с максимальной толщиной пера не более 9 мм. В

случае, когда по конструктивным особенностям СА должна иметь толщину более 9 мм, то необходимо перо СА выполнять полым;

2. в случае с охлаждаемым сопловым аппаратом или же полым в бандажной полке необходимо предусматривать технологические отверстия, для фиксации керамических стержней в оболочковой форме;

3. необходимо предусматривать в конструкции соплового аппарата радиусы скруглений (галтели). Так, в местах перехода от пера к хвостовикам радиус скругления 3...5мм; в турболоизаторах, расположенных в полости, не менее 0,5 мм.;

4. толщину стенок выполняют с клоном 0,5 мм на 100 мм. Толщина стенок пера не менее 0,6 мм.

5. расположение связывающих стенки корыта и спинки штырьков задается в шахматном порядке, диаметр и расстояние между ними не менее 2 и 4 мм соответственно. Сопряжение штырьков с внутренней поверхностью пера следует вылинять галтелями.

Заготовки-отливки соплового аппарат турбины делят на следующие методы:

- обычные, с поликристаллической или равновесной структурой;
- с направленной кристаллизацией;
- монокристаллические, имеющие столбчатую дендритную структуру.

Основным методом изготовления отливок соплового аппарата турбины ГТД является метод литья с направленной кристаллизацией (НК), схема получения отливок представлена на рисунке 1.4.

Отливки в процессе прохождения оболочковой формы с расплавом через зону градиента температур на поверхности раздела расплава и твёрдого металла приобретают ориентацию структуры. Контроль процесса кристаллизации отливки в керамической форме строго контролируется с

помощью создания строго регламентированных продольного и поперечного градиентов температур.

На данный момент в отечественном авиадвигателестроении находит свое применение два вида технологии получения отливок сопловых аппаратов турбины: низко- и высокоградиентной (высокоскоростной) направленной кристаллизации.

Рассмотрим более подробно технологический процесс литья по выплавляемым моделям отливки детали «Сопловой аппарат»

## 1.2 Технологический процесс литья по выплавляемым моделям отливки детали «Сопловой аппарат»

Первым этапом создания оболочковой формы является изготовление керамических стержней, которые формируют внутреннюю охлаждаемую поверхность сопловых аппаратов и восковок при помощи металлических прессформ.

Основным материалом, используемым при изготовлении стержней, является электрокорунд марок: 5, 12, 1410, 1420 и др., с добавлением небольшого количества пластификатора ППЭ-10 (5%) и алюминиевого порошка АСД4 (5%).

Стержень изготавливается под давлением ( $10...14 \cdot 10^3$  Па) в специальной пресс-форме. Далее стержень очищают от облоя и прилипших частиц, помещают на 3...5 мин. В ванну с тёплой водой (42...52 °С). Нагретый стержень устанавливается в драйер и выдерживают в нём 3...5 мин. Драйер представляет собой разъёмный стержневой ящик для сушки стержня, состоящий из двух половин, повторяющих профиль спинки и корыта. Далее стержни укладывают в короба, уплотняют глинозёмом и помещают в электропечь на прокалку.

По завершению прокалки стержни очищают, затем проводят проверку на наличие раковин, трещин, сколов и утяжин. После чего проводят проверку геометрических размеров и формы каждого стержня.

После процедуры контроля стержни пропитывают в растворе лака КО-815 с выдержкой, вплоть до прекращения выделения пузырей воздуха. Затем сушат при температуре 80...100 °С не менее 3ч.

Следующим этапом является изготовление моделей сопловых аппаратов. При изготовлении моделей сопловых аппаратов используют следующие материалы: парафин, стеарин, канифоль, церезин, полистирол, пластмассы, битум нефтяной и др. Основным материалом, используемым в настоящее время, является модельная масса, состоящая из карбомида марки А (ГОСТ 2081-75), селитры калиевой марок А, Б, В (ГОСТ 19790-74), силикагеля технического (ГОСТ 3956-76).

Модели формируют в специальных стальных пресс-формах. При изготовлении пресс-форм необходимо учитывать усадку модельного состава и усадку расплава при кристаллизации в оболочковой форме, так же необходимо предусмотреть технологические отверстия для установки стержня. Поверхности пресс-формы, контактирующие непосредственно с модельным составом, покрывают тонким слоем смазки, состоящей из смеси этилового спирта и касторового масла в соотношении 1:1. Стержень ориентируют в пресс-форме по технологическим отверстиям. Далее собирают пресс-форму, производят вакуумирование и прессуют модель сопловых аппаратов. Затем модель очищают от облоя и заусенцев, проводят контроль.

После изготовления моделей сопловых аппаратов производят сборку литниково-питающей системы (ЛПС). Данный процесс производят в кондукторе, обеспечивая тем самым высокую точность взаимного расположения модели сопловых аппаратов и литниковой системы.

Сам процесс изготовления оболочковой формы (керамической) включает в себя поочередное покрытие ЛПС керамической обмазкой, обсыпки электрокорундом и сушки. Сушка состоит из двух этапов:



1. Естественная сушка в воздушной среде в вытяжном шкафу в течение 2 часов;

2. Ускоренная сушка в аммиачно-газовой среде в течении 40...50 мин.

В состав обмазки входит электрокорунд и этилсиликат ЭТС-40 ( $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ )– этиловый эфир ортокремниевой кислоты)

В зависимости от размеров сопловые аппараты и габаритов ЛПС керамическая оболочка состоит из 7 ... 12 слоёв, при этом толщина обмазки составляет 1 – 1,5 мм. При формировании крайних слоёв на оболочку наносится только суспензия без обсыпки, для повышения общей прочности формы.

Контроль сушки каждого слоя заключается в отсутствии отставания и растрескивания обмазки после погружения пробной модели в гидролизированный этилсиликат.

После просушки необходимо очистить оболочку от модельного состава. В зависимости от материала модельный состав вымывают под давлением, выжигают или вытапливают.

Далее переходят к заливке. Процесс заливки начинается с прокалики оболочек. После того, как модельную массу удалили из керамической формы, форму сушат и обжигают. Обжиг происходит в камерных печах при температурах не выше 700 °С, за тем температуру повышают до  $1080_{-10}^{+20}$  °С и выдерживают при данной температуре от 6 до 8 часов. Далее форма охлаждается вместе с печью до температуры 800 °С. Необходимо учитывать, что для каждого материала программа обжига строго индивидуальна и данная модель показана для осведомления.

Далее в вакуумных индукционных печах расплавляют металл и заливают в форму. Направленная кристаллизация осуществляется постепенным погружением керамической формы в ванну жидкого алюминия марки А66 при температуре расплава 670...800 °С со скоростью  $20 \pm 2$  мм/мин.

После кристаллизации оболочковые формы охлаждают на воздухе более 4 часов, далее производят ручную отбивку керамики от отливки. Процесс отрезки отливки от литниково-питающей системы происходит абразивным отрезным кругом толщиной 3...5 мм, обдувают электрокорундом, полируют. Далее осуществляется контроль на макроструктуру, в тоже время образцы проходят проверку на химический состав и механические свойства, такие как: сопротивление растяжению, твёрдость, пластичность и ударную вязкость.

Далее керамические стержни (знаки) удаляются при помощи их растворения в бифториде калия при температуре 350...370 °С в течение 1,5...4,5 ч. После растворения отливки тщательно промывают в воде.

Основными задачами контроля отливок являются: выявление внутренних и внешних дефектов в металле отливок, проверка полноты удаления остатков стержневой керамики.

При контроле внутренних дефектов в каждой отливке применяют метод диагностики рентгеновским излучением. Для этого необходимо заполнить внутреннюю полость отливки контрастирующим гранулированным порошком из сплава ЖС6У, который необходимо предварительно просушить при температуре 150...180 °С в течение 1,5...2 ч. Одновременно с контролем внутренних дефектов проверяется полнота удаления стержневой керамики.

Далее перо отливок полируют абразивной лентой, промывают в 5%-ном водном растворе вертолина при температуре 80...90°С. После чего отливки промывают в воде и подвергают жидкоабразивной обработке, и затем снова производят промывку водой.

Далее отливку проверяют внешним контролем на наличие: открытых трещин, пор и коррозионного поражения методом ЛЮМ-10В.

### 1.3 Анализ систем компьютерного моделирования литейных процессов

В мире существует множество программных продуктов способных в том или ином объёме решать задачи по моделированию технологического

процесса литья. Наиболее распространенные в мировой практике программные комплексы представлены в таблице 1.

Все программные продукты условно можно разделить по применяемому для расчётов методу на три группы:

1. программы (Magmasoft, SolidCast, CastCAE, JSCAT, AnyCating и др.) основанные на методе конечных разностей (МКР) отличаются высокой скоростью рассчитать распределение усадочных дефектов в отливки и исправить технологию литья. Однако при расчёте тонкостенных отливок, в которых толщина стенки сопоставима с шагом разбиения сетки, не подходят, так как в таком случае разбиение модели путём наложения прямоугольной сетки с постоянным шагом приводит к увеличению числа расчётных ячеек в особенности при расчёте крупногабаритных тонкостенных отливок.

Таблица 1 – Программные комплексы для моделирования технологического процесса литья

Программный комплекс	Страна - разработчик	Программный комплекс	Страна - разработчик
Magmasoft	Германия	Flow3D	США
WinCast	Германия	PowerCast	США
PROCast	Франция	SolidCast	США
QuikCast	Франция	CAPCast	США
PAM-Cast	Франция	RAPID/CAST	США
CalcoSoft	Франция	AnyCasting	Корея
Vulcan	Испания	CastCAE	Финляндия
JSCAST	Япония	LVMFlow	Россия
Полигон	Россия	FlowVision	Россия
Mavis-Flow	Англия	AutoCast	Индия
InteCast	Китай	Castlow, Casterm	Австралия

2. методов конечных элементов (МКЭ), который применяется в таких программах, как: Полигон, WinCast и др. обеспечивают высокую точность выявления даже незначительных дефектов и максимально учесть

геометрию отливки. Данные возможности достигаются путем разбиения исходной модели на конечные элементы, наиболее распространены тетраэдры. Несмотря на то, что встроенные сеточные генераторы дают большие погрешности, точность построения сетчатой модели высока, это достигается путём применения внешнего сеточного генератора КЭ. Однако данная особенность значительно увеличивает стоимость программы и время расчёта.

3. ещё одним методом расчёта является метод контрольных объёмов (МКО) данный метод включает в себя простоту и факторизацию метода конечных разностей, и хорошую аппроксимацию границ между различными материалами и фазами. Данное сочетание позволяет проводить расчёты максимально быстро, при этом не теряя точности. На данном методе пока основывается только два программных продукта: Flow3D и LVMFlow.

К сожалению, не все мировые программные продукты доступны для России, это связано с отсутствием высококвалифицированных специалистов, ценовой политики. Поэтому главным параметром при выборе программного продукта является его стоимость и полнота расчёта. В таблице 2 показаны программы, распространённые на территории России и их функциональные возможности. Наиболее функциональными программами являются WinCast и ProCast, при этом WinCast имеет преимущество только в возможности расчёта термообработки.

Выбор программного продукта при расчёте литья соплового аппарата I-ой ступени турбины ГТД был сделан в пользу ProCast так, как только этот программный продукт имеется в университете.

Таблица 1.2 – функциональные возможности программных продуктов моделирования процесса литья

Наименование программных комплексов	Функциональные возможности программных комплексов							
	Страна производитель	Заливка	Тепломассоперенос	Затвердевание	Усадочные дефекты	Напряжения	Микроструктура	Термообработка
ProCast	Франция	+	+	+	+	+	+	-
WinCast	Германия	+	+	+	+	+	+	+
Полигон	Россия	+	+	+	+	-	-	-
PowerCast	США	+	+	+	-	-	-	-
MagmaSoft	Германия	+	+	+	+	+	-	-
SolidCast (AFSolid)	США	+	+	+	+	-	-	-
FlowVision	Россия	+	+	-	-	-	-	-

#### 1.4 Выводы по главе

Исходя из анализа современного состояния технологического процесса изготовления деталей газотурбинного двигателя, а именно технологии литья соплового аппарата турбины первой ступени можно сделать следующие выводы:

1. на данный момент существует проблема высокого процента брака (более 50%) при изготовлении отливок сопловых аппаратов турбины методом литья по выплавляемым моделям;
2. несмотря на большой опыт применения технологии литья по выплавляемым моделям отсутствует имитационная цифровая модель процесса литья, поэтому построение технологического процесса происходит методом проб и ошибок;

3. длительность технологического цикла изготовления соплового аппарата и технологической оснастки (5-7 месяцев).

## 2. РАЗРАБОТКА МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ЛИТЬЯ СОПОЛОВОГО АППАРАТА ПРИ ПОМОЩИ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Современные тенденции развития производственного процесса требуют максимального сокращения расходов и временных затрат на апробирование конструкции или технологического процесса изготовления той или иной детали. То есть сокращение затрат на опытное производства. Данную задачу можно решать двумя способами: это внедрение инновационных методов изготовления деталей в уже существующий технологический процесс, тем самым модернизируя его (например, применения технологии быстрого прототипирования в технологическом процессе изготовления отливок СА турбин) или идти путём отработки технологического процесса по средствам применения цифрового двойника.

Цифровой двойник – это полная копия реального технологического процесса, которая служит ключевым звеном виртуального производства отливок или других изделий в зависимости от поставленной задачи. Применение виртуального производства подразумевает полное воспроизведение технологического процесса при помощи специального программного обеспечения (например, ProCast), которое позволяет произвести расчет процесса литья и последующей кристаллизации отливки и по результатам расчета увидеть полную картину, отражающую как положительные, так и отрицательные стороны технологического процесса. После анализа результатов расчёта делаются выводы по модернизации технологического процесса и расчет повторяется вновь, пока не будут достигнуты максимальные показатели качества отливки, что в свою очередь приводит к значительному снижению количества брака и снижению стоимости изготовления сопловые аппараты, а как известно, сопловой аппарат является наиболее дорогой деталью двигателя.

## 2.1 Расчет процесса литья и кристаллизации отливки соплового аппарата турбины ГТД

В процессе расчета, а именно при подготовке и настройке параметров расчёта необходимо в полной мере отобразить технологический процесс, от геометрии литниково-питающей системы в целом и отливки в частности до параметров заливки и граничных условий, в том числе физико-механические свойства материала.

### 2.1.1 Построение объёмной модели литейного блока

Первым этапом на пути расчета является построение объёмной модели литниково-питающей системы в CAD/CAE/CAM системе, в Нашем случае был использован программный продукт Siemens NX. Данная система использует ядро геометрического моделирования Parasolid.

В процессе построения необходимо воспроизвести литниково-питающую систему и отливку, при этом обеспечить полное соответствие геометрии и размеров виртуальной модели с оригинальной, то есть воспроизвести, отталкиваясь от конструкторской документации.

В нашем случае объёмная модель соплового аппарата турбины была предоставлена конструкторским бюро, необходимо было только отмасштабировать на необходимый процент усадки, вызванной кристаллизацией и остыванием отливки, а так же заложить припуски на механическую обработку, припуск на поверхность пера (эквидистантно) и на трактовую часть для последующей полировки.

Далее необходимо было построить литниково-питающую систему, используя уже готовую 3D модель сопловых аппаратов и эскиз ЛПС, так же предоставленную предприятием (рисунок 2.1).



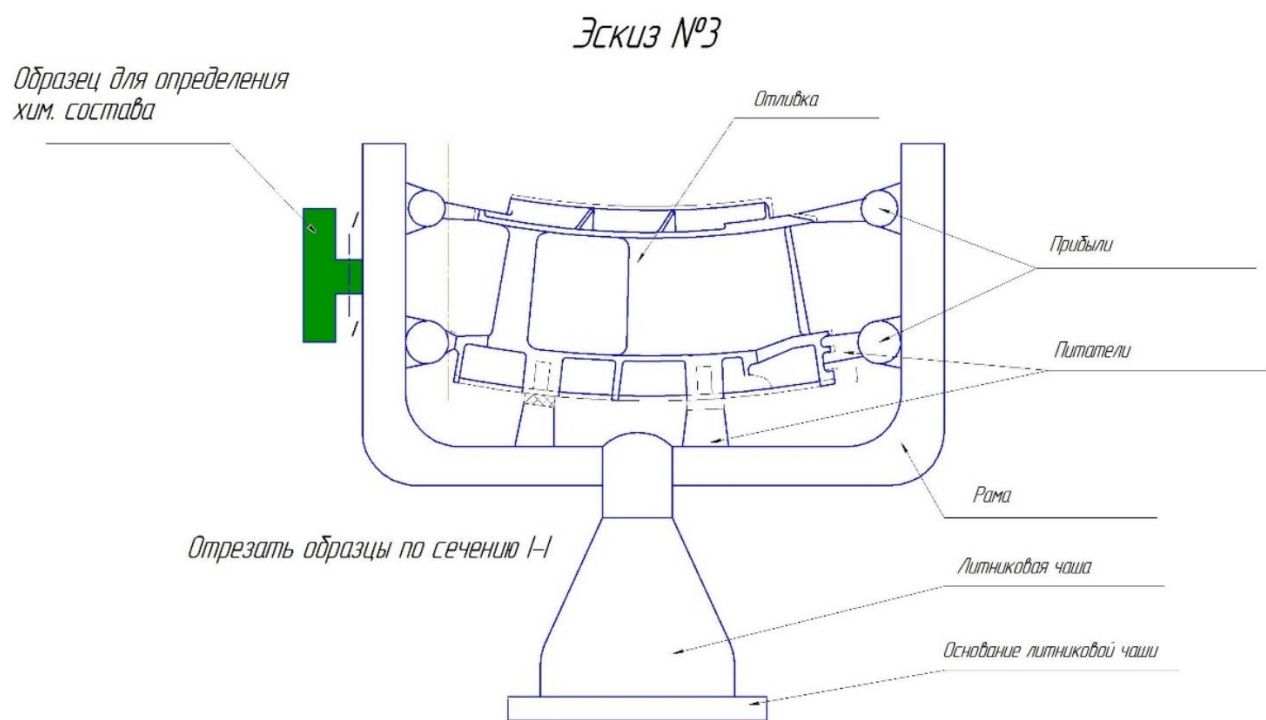


Рисунок 2.1 — Эскиз литниково-питающей системы

Построенная 3D модель литниково питающей системы представлена на рисунке 2.2.

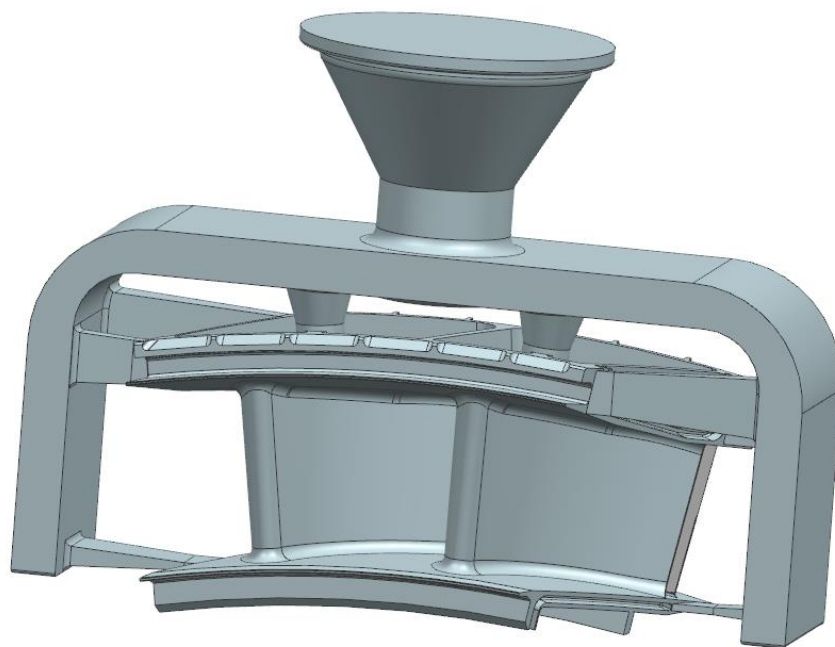


Рисунок 2.2 — 3D модель литниково-питающей системы

После построения, 3D модель необходимо экспортировать в формат «.xt», так как ProCast может воспринимать геометрию только в формате Parasolid.

### 2.1.2 Проектирование конечно-элементной модели отливки

Следующим этапом в процессе расчета является построение сетки конечных элементов. Построение сетки происходит в программном продукте ProCast в модуле Visual-Mesh, после открытия модуля необходимо импортировать 3D модель, предварительно экспортированную в формат «.xt».

После загрузки объемной модели необходимо провести проверку импорта геометрии. Проверку производят при помощи функции «Check» во вкладке «Repair» (рисунок 2.3).

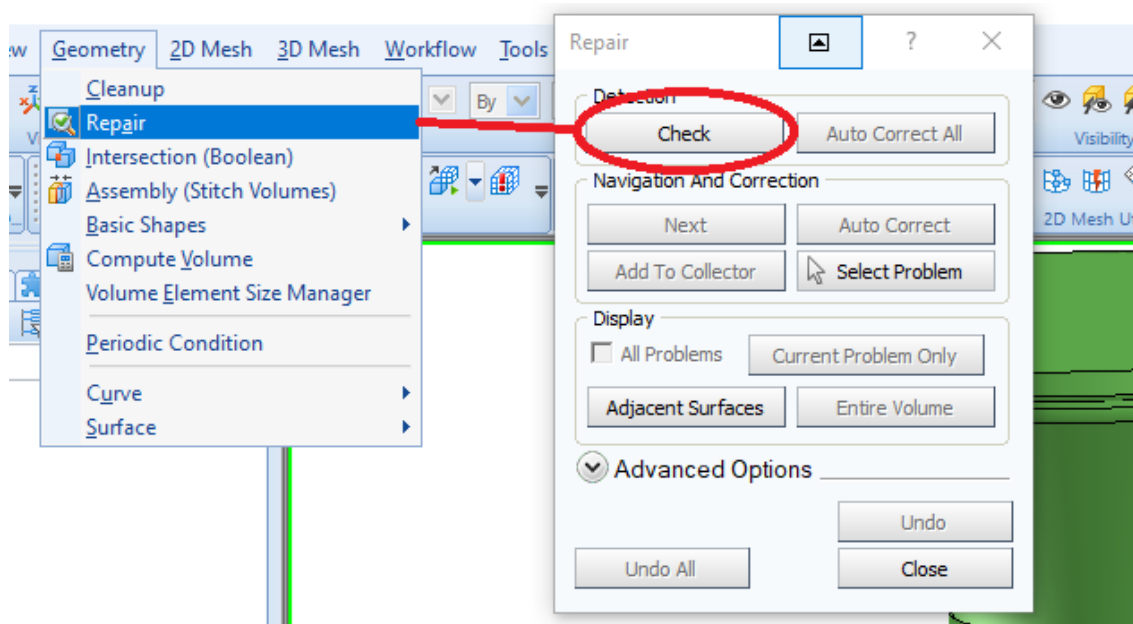


Рисунок 2.3 — Проверка импорта геометрии

Проверка необходима, для исключения ошибок импорта геометрии, которые в последствии могут нарушить процесс построения сетки конечных элементов, что приведет к искажению результатов расчёта или ошибке запуска самого расчёта. При наличии ошибок их можно исправить самостоятельно в CAD/CAM/CAE системе или исправить автоматически при помощи функции «Auto Correct» (рисунок 2.4).

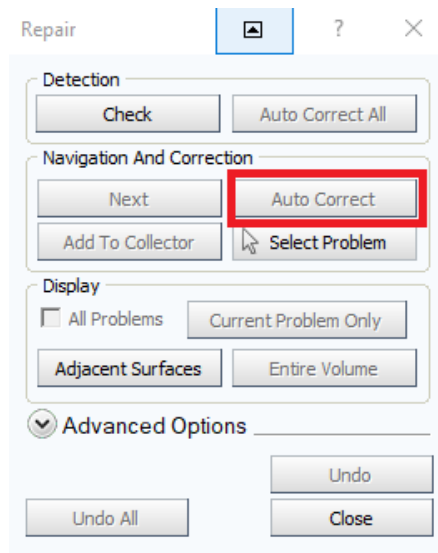


Рисунок 2.4 — Функция автоматического исправления ошибок геометрии

В нашем случае результат проверки показал отсутствие ошибок (рисунок 2.5), что позволяет перейти непосредственно к построению сетки конечных элементов.

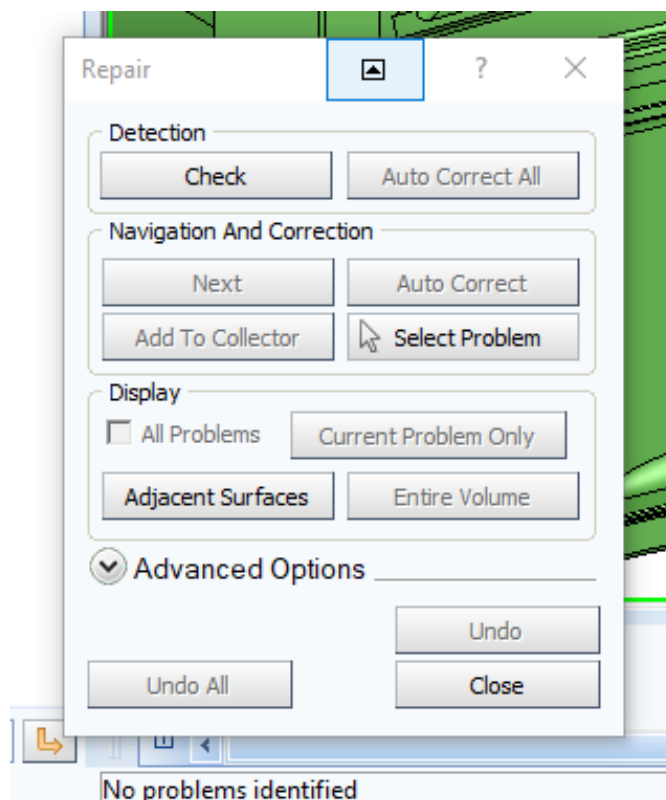


Рисунок 2.5 — Результаты проверки импорта геометрии

Построение сетки конечных элементов делиться на три этапа:

1. построение поверхностной сетки;

2. построение оболочковой формы;
3. построение объёмной сетки.

Построение поверхностной сетки происходит при помощи функции «Surface Mesh» в разделе «2D Mesh» (рисунок 2.7).

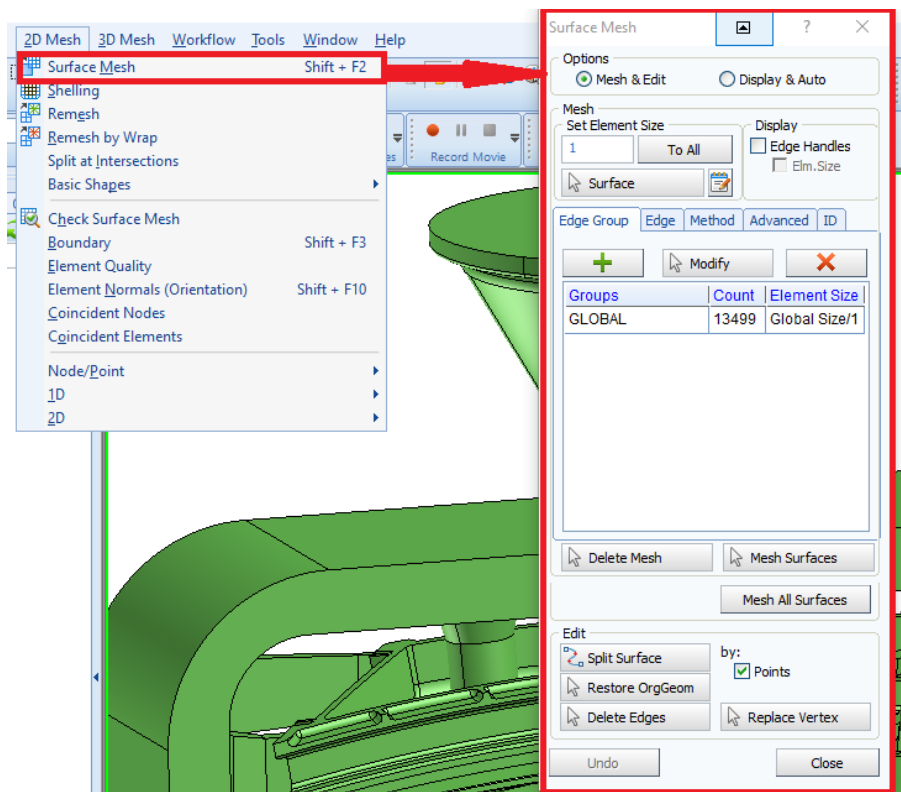


Рисунок 2.6 — Построение поверхностной сетки

При создании сетки принято разделять литниково-питающую систему на 3-и группы, разделенных по размерам конечных элементов, т. е. для наиболее значимых элементов ЛПС задаются конечные элементы минимальных размеров, а для наименее важных – элементы больших размеров. Данный метод позволяет получать результаты с высокой точностью, при этом значительно снизив время расчета, за счёт сокращения времени на расчет менее важных элементов. Так для литниково-питающей системы размер конечных элементов равен 5, так как она имеет наиболее низкую важность для конечных результатов расчета, питатели имеют размер элементов равный 2 и размер элементов пера равен 1, как для наиболее важному элементу в расчетах (рисунок 2.7).

После построения поверхностной сетки необходимо провести проверку качества сетки. Данная операция выполняется при помощи функции «Check Surface Mash», по результатам которой должен быть сделан вывод об отсутствии или наличии ошибок. Во втором случае необходимо провести операцию по автоматическому исправлению ошибок при помощи функции «Auto Correct».

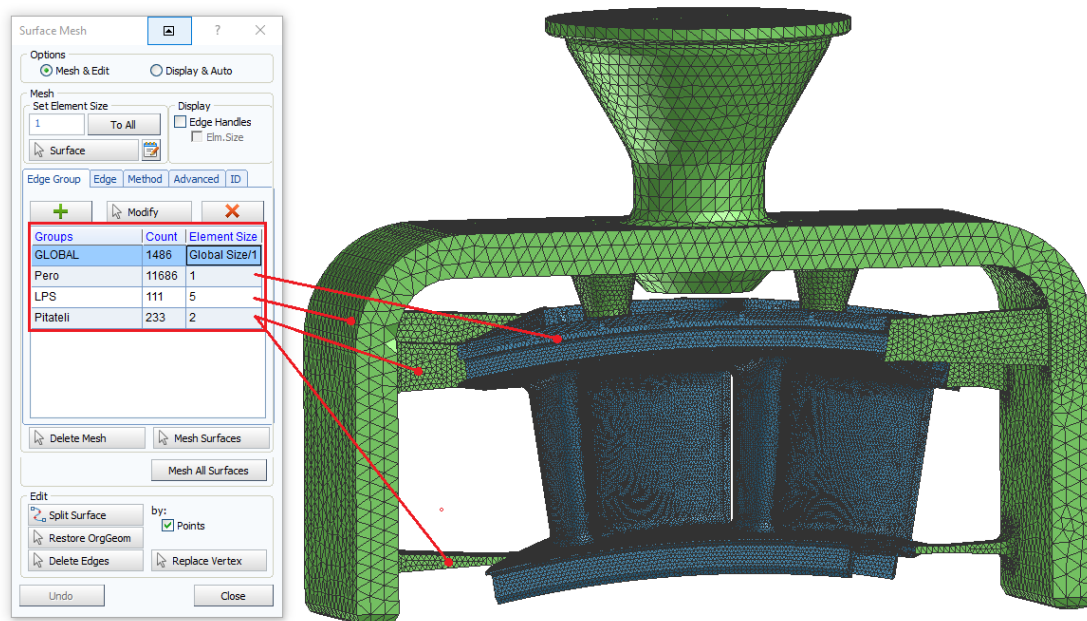
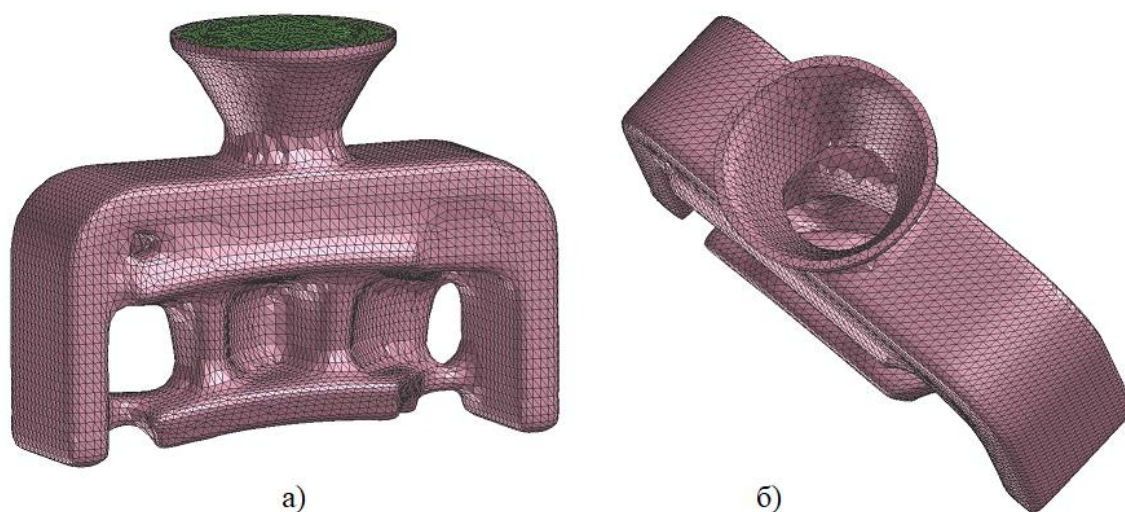


Рисунок 2.7 — Результат построения поверхностной сетки

Далее создается модель керамической оболочки при помощи функции «», задается количество слоев и поверхность заливки, для исключения её из построения формы. При этом необходимо учитывать данные из технологического процесса, а именно количество слоев керамической формы. В данной случае количество слоев равнялось 7, результат моделирования керамической формы показан на рисунке 2.8.

После построения керамической оболочки необходимо проверить её качества, данная операция проводится так же ,как и проверка качества построения поверхностной сетки, то есть с применением функции «Check Surface Mash», и, при наличии ошибок, необходимо их исправить при помощи функции «Auto Correct».

Завершающим этапом построения сетки конечных элементов является построение объёмной сетки.



а — с ЛПС, б — без ЛПС

Рисунок 2.8 — Оболочковая форма

Построение объёмной сетки происходит автоматически, то есть не требует каких-либо дополнительных настроек, при помощи функции «Create Volume Mesh», единственным требованием является отсутствие ошибок при построении поверхностей сетки. Результаты генерации объёмной сетки показаны на рисунке 2.9.

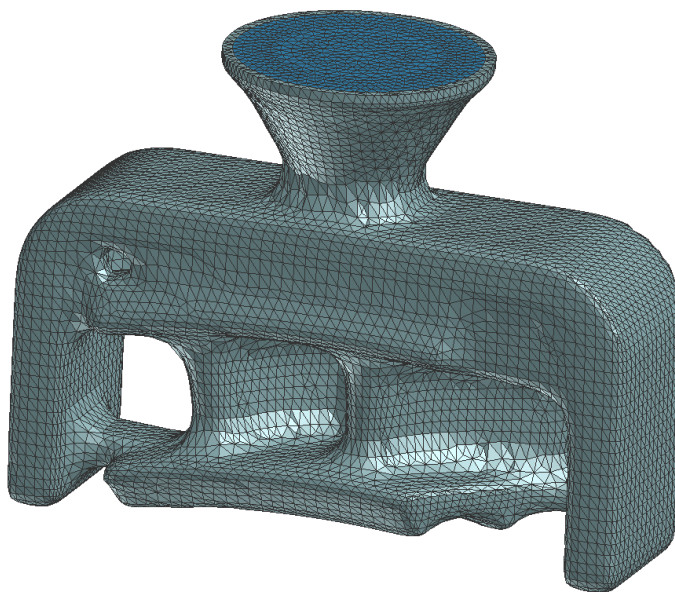


Рисунок 2.9 — Результат построения объёмной сетки

Перед переход в препроцессор «Cast» необходимо проверить качество построения объемной сетки, в данном случае ошибок обнаружено не было.

### 2.1.3 Настройка параметров процесса расчета и запуск на расчёт

Настройка параметров процесса и запуск расчета происходят в модуле «Cast», рассмотрим более подробно данный процесс.

На первом этапе, а именно сразу после открытия модуля, необходимо обозначить вектор гравитации, ориентируясь на который, будет происходить процесс симуляции заливки расплава в керамическую форму. В данном случае вектор гравитации совпадает с осью Z модели ЛПС (рисунок 2.10).

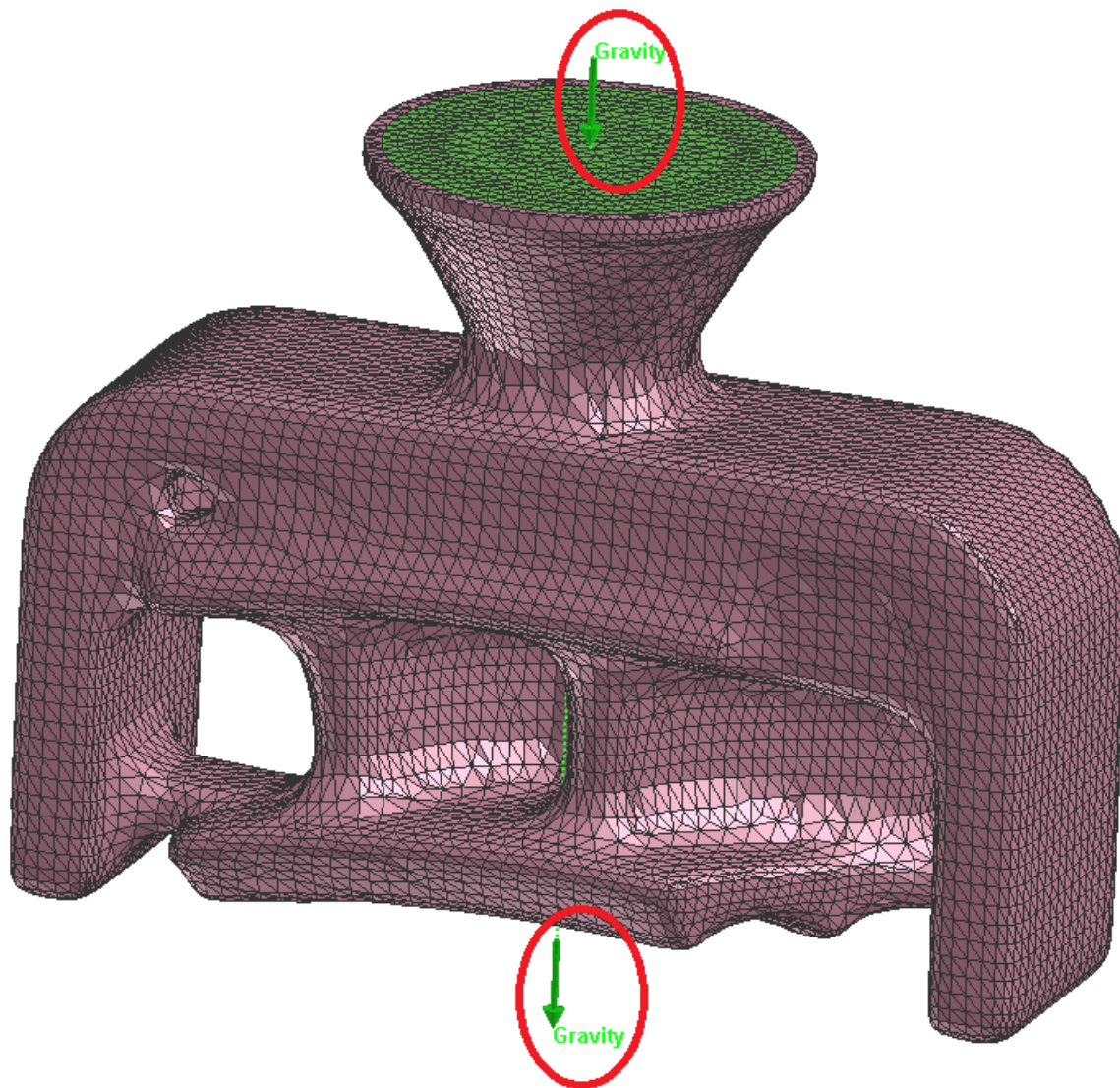


Рисунок 2.10 — Назначения вектора гравитации

Следующим этапом необходимо задать объемные параметры при помощи функции «Volume manager» (рисунок 2.11).

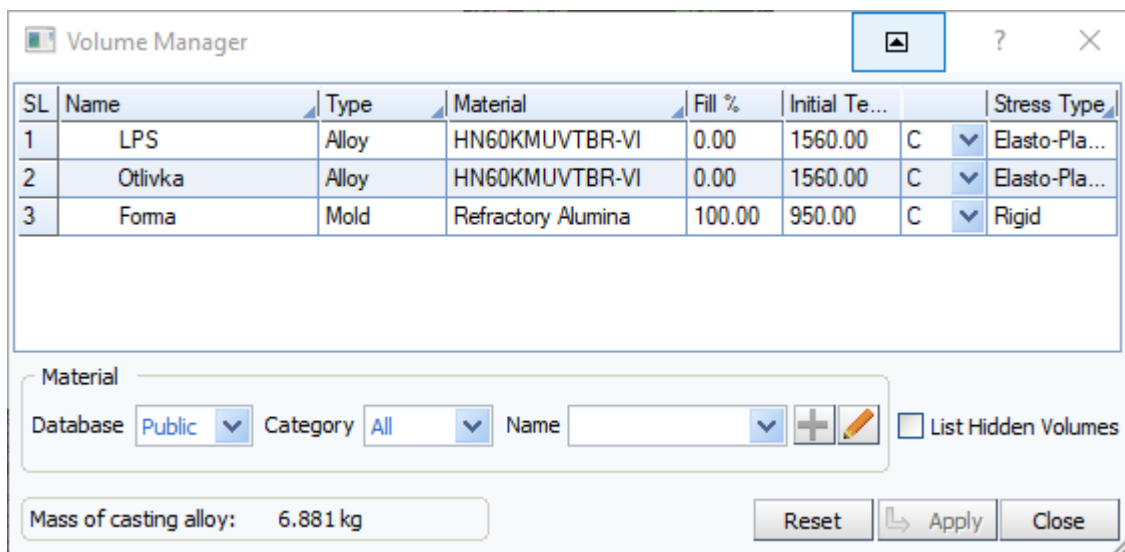


Рисунок 2.11 — Окно задание параметров «Volume manager»

Сначала обозначением тип каждой модели, то есть форма или расплав так, для ЛПС и отливки задаем значение «Alloy», что обозначает расплав, а для керамической формы задаем значение «Mold», что обозначает форма.

Далее необходимо назначить материал для каждого элемента модели расчёта, для формы задаем материал «Refractory Alumina», который есть в базе ProCast. Так как ProCast является европейской программой, то в базе данных отсутствуют отечественные сплавы, в особенности жаропрочные. Но программный продукт ProCast позволяет вносить изменения в уже имеющуюся базу данных в том числе новые материалы, для внесения новых материалов необходимо иметь точный состав расплава. На основе химического состава и механических характеристик материала (рисунок 2.12) ProCast рассчитывает материал автоматически, но для более точного расчета необходимо дополнительно вносить зависимость модуля пластичности от температуры и проверять значения модуля Юнга и другие коэффициенты со справочными (рисунок 2.13).



Так же необходимо обозначит процент заполнения каждой модели в начальный момент времени «Fill», так для литниково-питающей системы и отливки процент заполнения будет равен 0, так как в начальный момент времени расплав не подается в форму, форма же наоборот имеет 100% заполнения сразу же после запуска расчета.

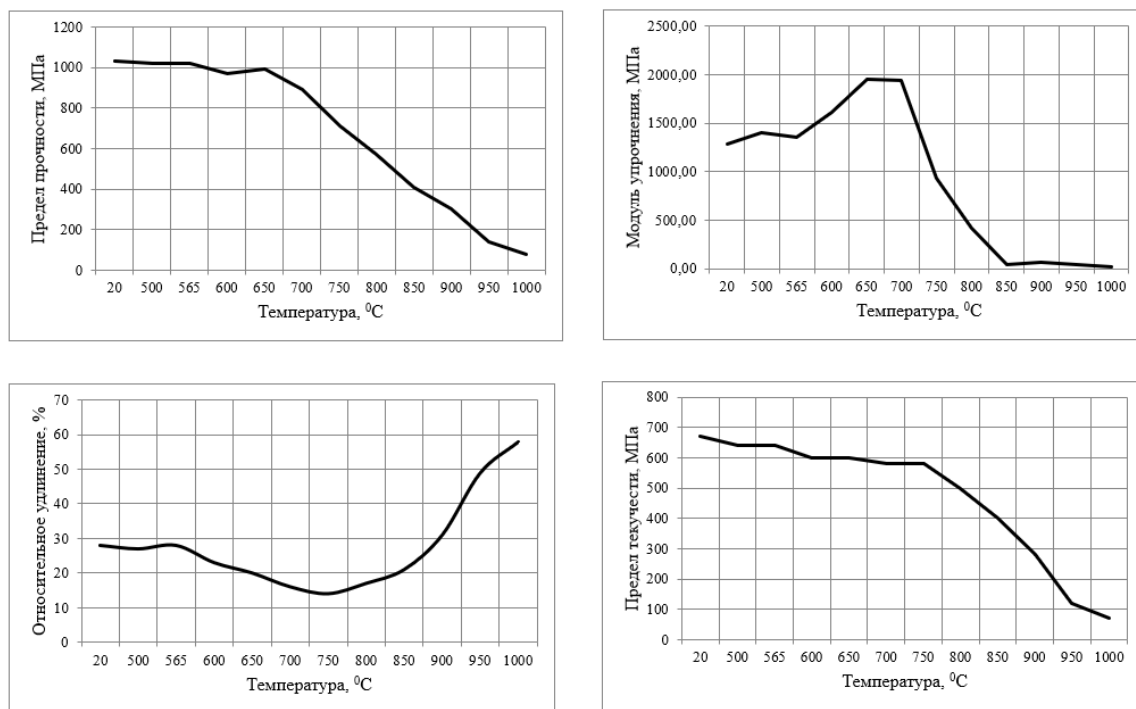


Рисунок 2.12 — Химический состав и механические свойства сплава XH70VMYOT

После чего указывается температура каждого элемента в начальный момент времени: для ЛПС и отливки – 1560 °С, для керамической оболочки – 950 °С.

В данном разделе оставляем исходные значения, обозначенные системой автоматически, основываясь на предыдущих параметрах (рисунок 2.14).

Далее необходимо задать параметры процесса заливки в окне «Process Condition Manager» (рисунок 2.15).

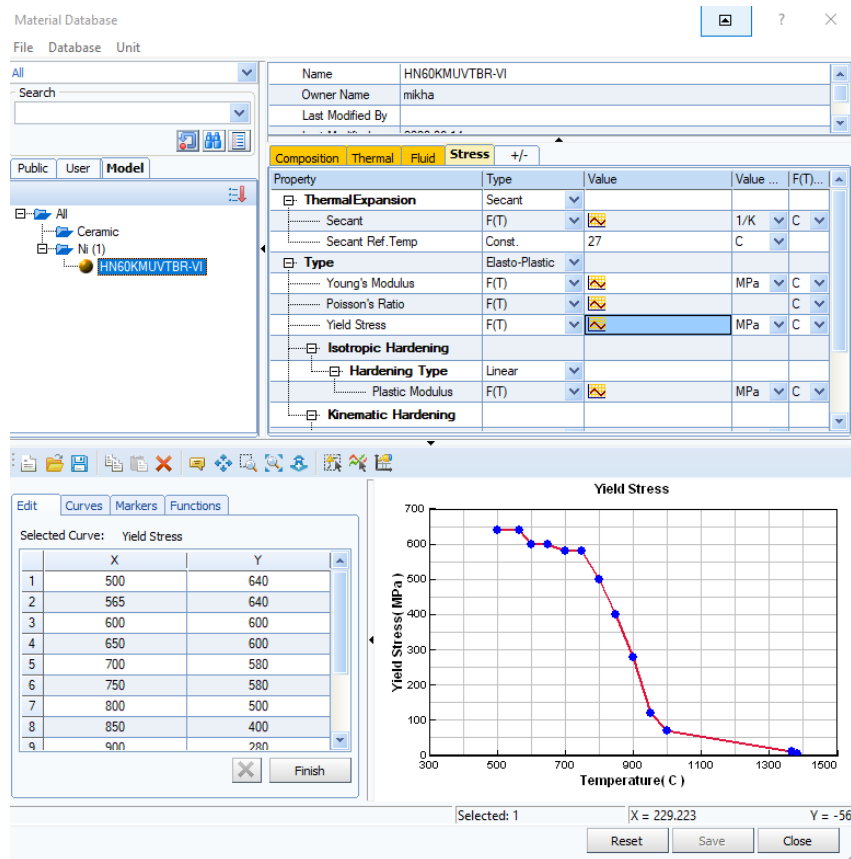


Рисунок 2.13 — Зависимость модуля пластичности от температуры

The screenshot shows the Interface HTC Manager interface. It displays a table of interface conditions with the following data:

SL	Name	Type	Interface Condition
1	LPS_Otlivka	EQUIV	...
2	LPS_Forma	COINC	HTS_Alloy_Mold
3	Otlivka_Forma	COINC	HTS_Alloy_Mold

Below the table, there is a search filter section for 'Interface HTC Condition' with the following settings:

- Database: Public
- Category: All
- Name: [Empty]

Buttons for 'Reset', 'Apply', and 'Close' are located at the bottom right of the window.

Рисунок 2.14 — Установленные значения параметров в окне «Interface HTC Manager»

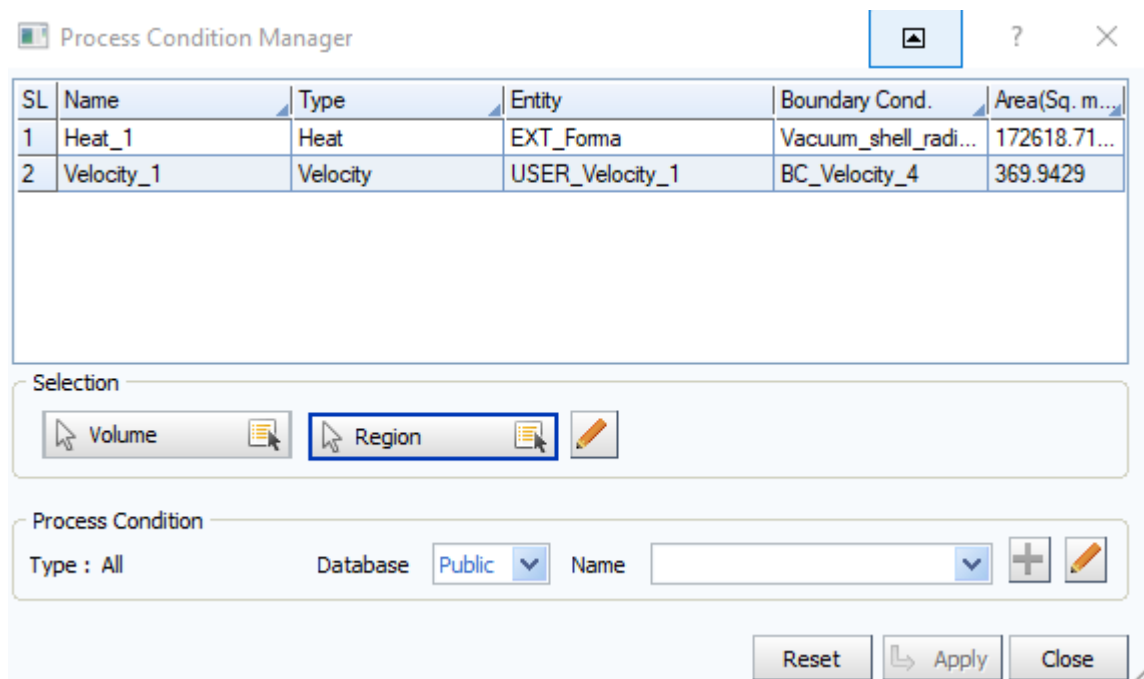


Рисунок 2.15 — Окно параметров процесса заливки «Process Condition Manager»

1. первым параметром является описания процесса передачи тепла, задается объект, через который происходит теплоотвод – форма, граничные параметры процесса – излучения тепла в вакууме и автоматически подсчитывается площадь контакта;

2. далее задаются начальные условия процесса литья, выбирается объект расчета, в данном случае – скорость (velocity), затем обозначается график скорости заливки в зависимости от времени (рисунок 2.16). Обозначается место расположения и площадь “пятна” заливки и также автоматически рассчитывается, и вносится в базу данных площадь “пятна” заливки (рисунок 2.17).

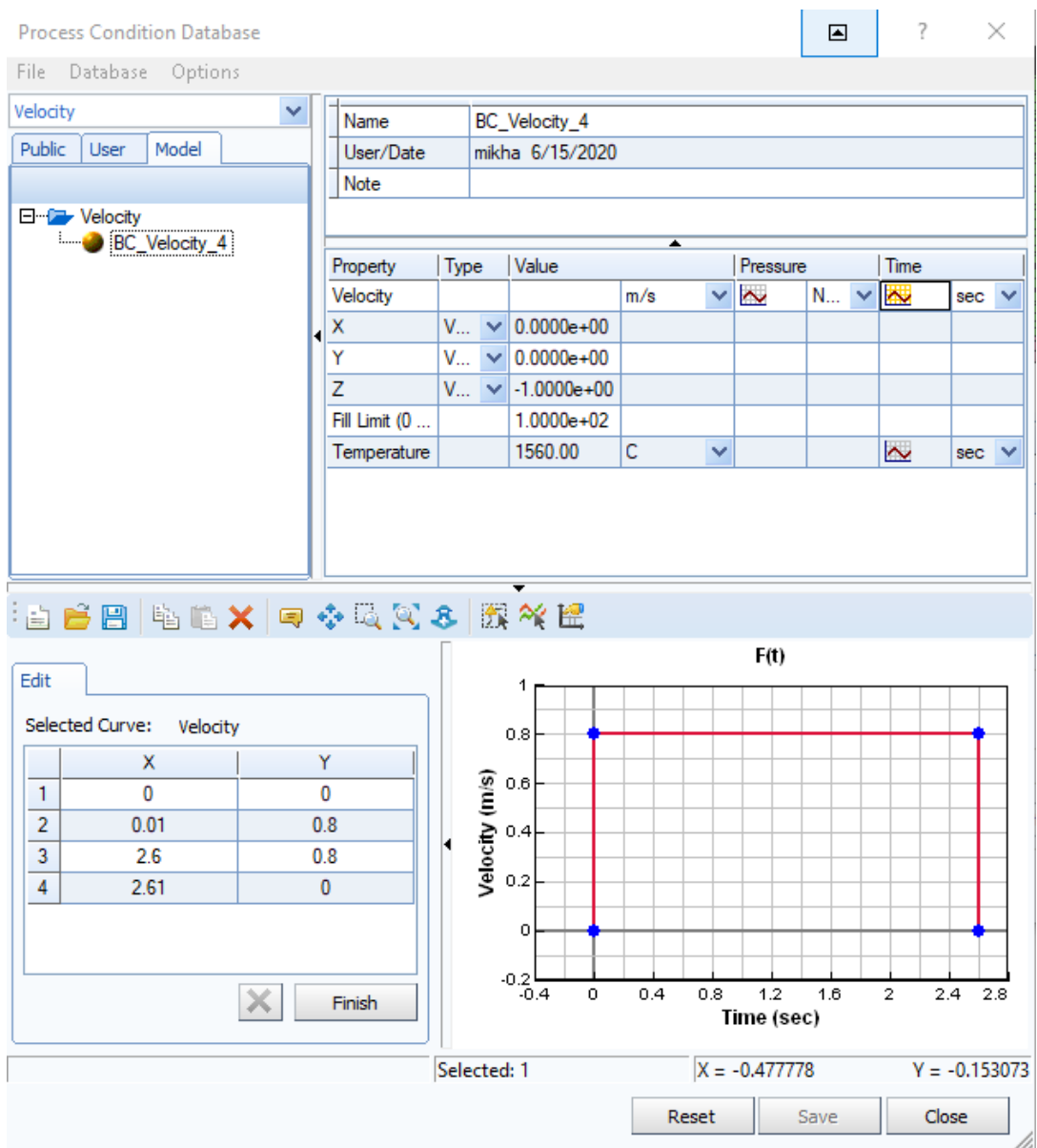


Рисунок 2.16 — Построение графика зависимости скорости заливки от времени

Так же необходимо задать параметры самого расчета такие как: условия остановки, шаги расчета, единицы измерения, количество задействованных ядер процессора и др. (рисунок 2.18).

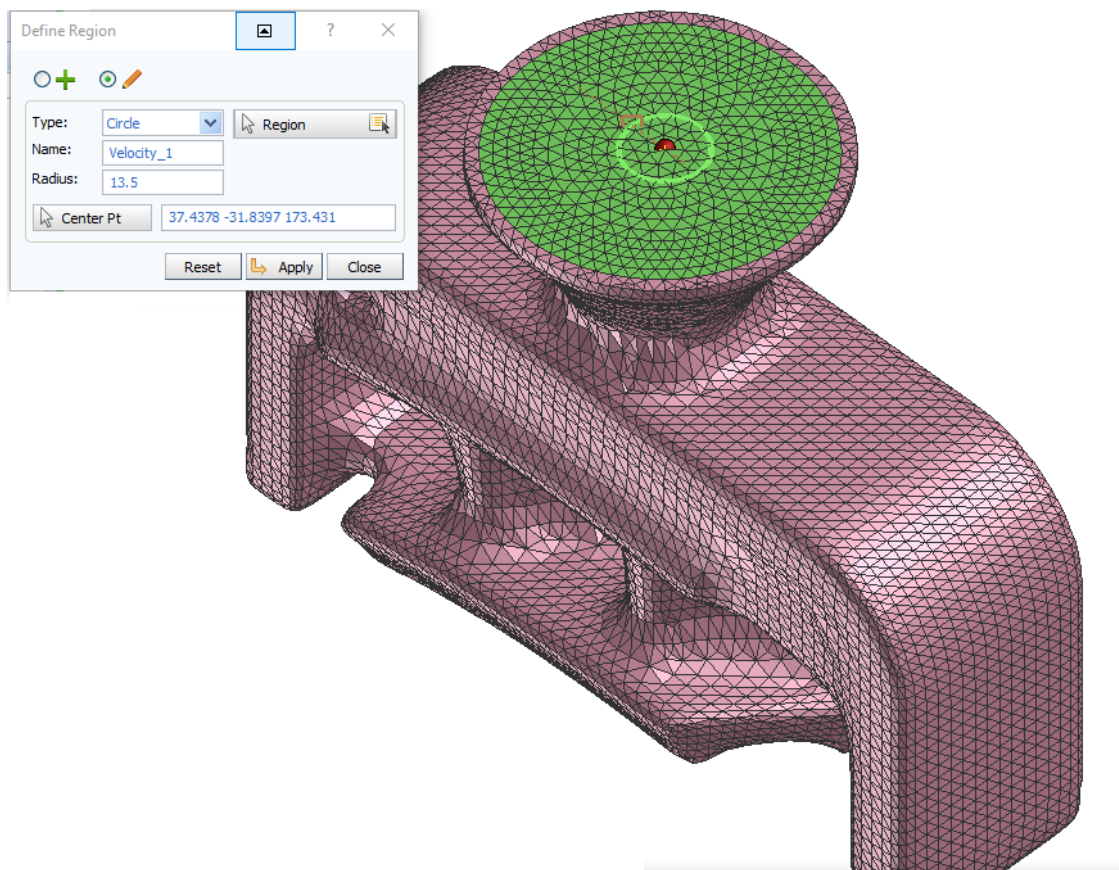


Рисунок 2.17 — Параметры процесса заливки керамической формы

Simulation Parameters

File Category Unit

Pre-defined Parameters   Show String Selection

General Thermal Flow +

Parameter		Type	Value	Value Unit	F(t) U...
<b>NSTEP</b>	Stop criterion : Max.num...	Const.	50000		
<b>TFINAL</b>	Stop criterion : Final Time	Const.	3.0000e+00	sec	▼
<b>TENDFILL</b>	Stop criterion : Time after...	Const.	0.0000e+00	sec	▼
<b>TSTOP</b>	Stop criterion : Final Tem...	Const.	0.0000e+00	C	▼
<b>TSTOP_PART</b>	Stop criterion : Select Vo...				
<b>INILEV</b>	Restart Step	Const.	0		
<b>DT</b>	Initial Timestep	Const.	1.0000e-03	sec	▼
<b>DTMAXFILL</b>	Maximum Timestep for Fil...	Const.	▼ 1.0000e-01	sec	▼ sec ▼
<b>DTMAX</b>	Maximum Timestep	Const.	▼ 1.0000e+00	sec	▼ sec ▼
<b>TUNITS</b>	Temperature results Units	Const.	C	▼	
<b>QUNITS</b>	Heat Flux results Units	Const.	W/m^2	▼	
<b>VUNITS</b>	Velocity results Units	Const.	mm/sec	▼	
<b>PUNITS</b>	Pressure results Units	Const.	MPa	▼	

Рисунок 2.18 — Окно параметров симуляции

Далее проверяются все параметры от геометрии до задач по расчету при помощи функции «Data Checks» (рисунок 2.19), наличие ошибок строго запрещается, так как в большинстве случаев расчет не запустится, а если запустится, то точность и адекватность результатов будет крайне невелика.

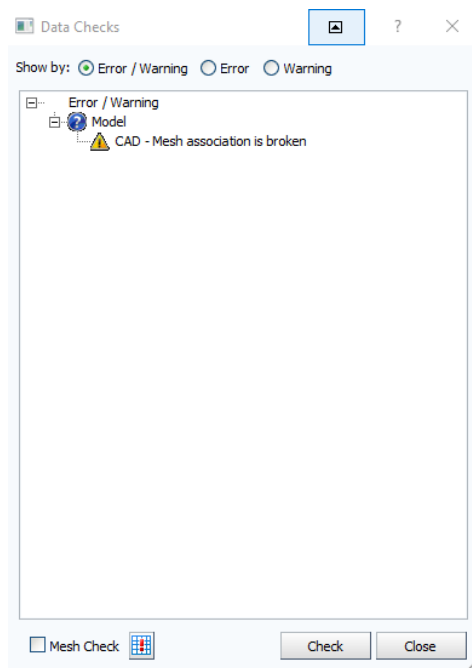


Рисунок 2.19 — Окно проверки параметров расчета «Data Checks»

После положительных результатов проверки переходим непосредственно к запуску расчета в окне «Star Simulation» (рисунок 2.20).

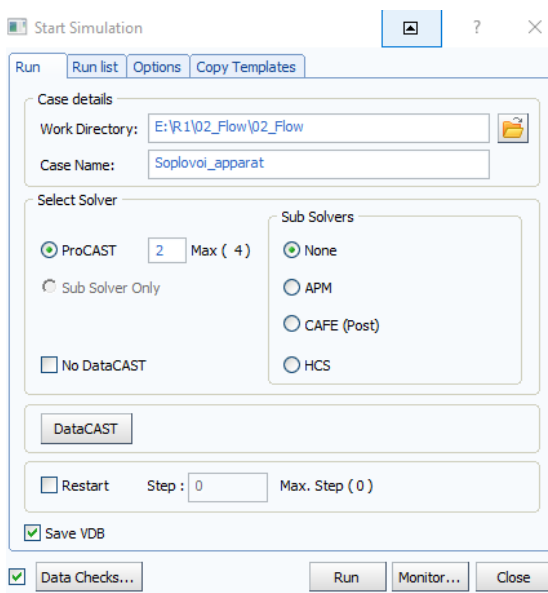


Рисунок 2.20 — Запуск расчета

Далее переходим в модуль «Visual-Viewer» для просмотра результатов расчета.

## 2.2 Анализ результата компьютерного моделирования базового процесса литья соплового аппарата

Анализ результатов расчета производится при помощи модуля «Visual-Viewer» в программной системе ProCast. Расчет делиться на 3 этапа:

- анализ результатов гидродинамических расчетов, полученных с использованием СКМ ЛП ProCast;
- анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния отливки, полученных с использованием СКМ ЛП ProCast;
- анализ результатов расчетов зеренной структуры в отливке.

### 2.2.1 Анализ результатов гидродинамических расчетов, полученных с использованием СКМ ЛП ProCast;

Гидродинамическая модель течения жидкости в ProCast (Flow) позволяет моделировать заполнение формы металлом, вычислять расход жидкости путем решения уравнения Навье-Стокса. В ходе использования гидродинамической модели течения могут быть получены типичные следующие результаты:

- ход заполнения формы;
- перемещение и изменение свободной поверхности;
- напорное течение жидкости и естественная конвекция;
- динамическое давление жидкости;
- газовые включения.

Первым этапом анализа результатов является изучения процесса заливки керамической оболочки расплавом. На рисунке 2.21 представлен характер заполнения формы расплавленным металлом и распределение тепловых потоков в различные моменты времени. По рисунку видно, что на полное

заполнение формы было потрачено 3.06 секунды. На рисунке 2.22 показан анализ характера поведения расплава металла в элементах литниково-питающей системы и в отливке детали. Видно, что в момент времени 1,1 секунд происходит начало заполнения по левому питателю, когда как правый питатель еще «пуст», что свидетельствует о неэффективности работы литниково-питающей системы, вызванным небольшой площадью поперечного сечения правого питателя. Так же на 1,35 секунде видно, что заполнение формы начинается по правому верхнему питателю, когда как правый нижний питатель все еще не выполняет свою функцию, что приводит к образованию полостей «карманов», которые, в свою очередь, приводят к дефектам отливки.

Анализ значений скоростного напора расплава представлен на рисунке 2.23. Необходимо отметить критический момент на 1,59 секунде заполнения. В этот момент времени в областях, выделенных на рисунке черной линией, наблюдается максимально значение скорости (более 0,8 м/с), связанное с уменьшением сечения. Так как эти области располагают в зоне непосредственного контакта с отливкой, то возможно прогнозирование в этих областях размыва внутренней поверхности керамической формы, что может повлечь захват частиц керамики в тело отливки и искажение геометрии. Чтобы избежать подобного дефекта можно рекомендовать изменить конструкцию ЛПС в этих областях: увеличить площадь поперечного сечения питателей и добавить литейные радиусы в местах перехода от элементов литниково-питающей системы к телу отливки, тем самым сгладить острые углы и продолговатые участки питателей.



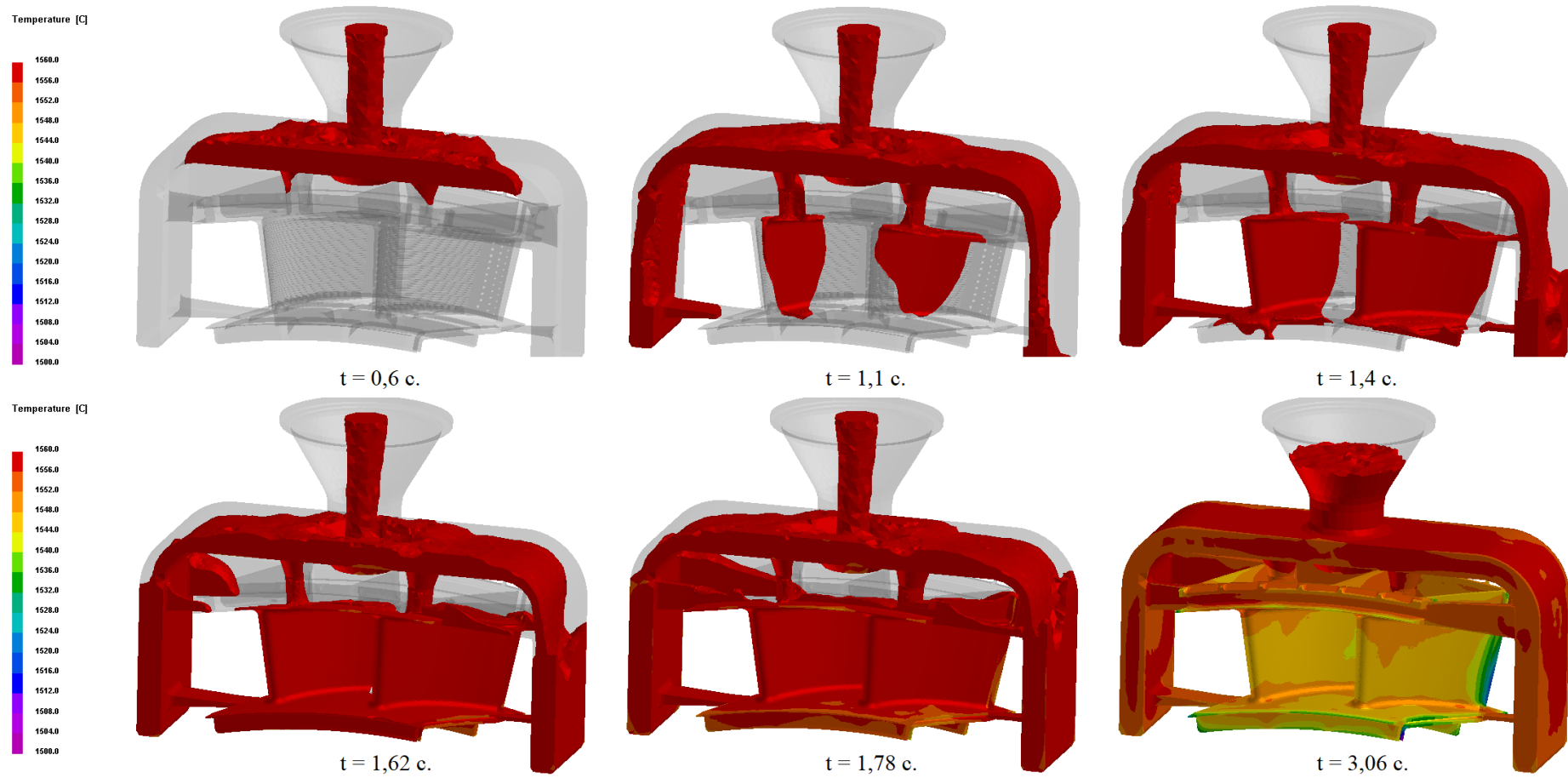


Рисунок 2.21 — Характер заполнения керамической формы расплавленным металлом в различные моменты времени

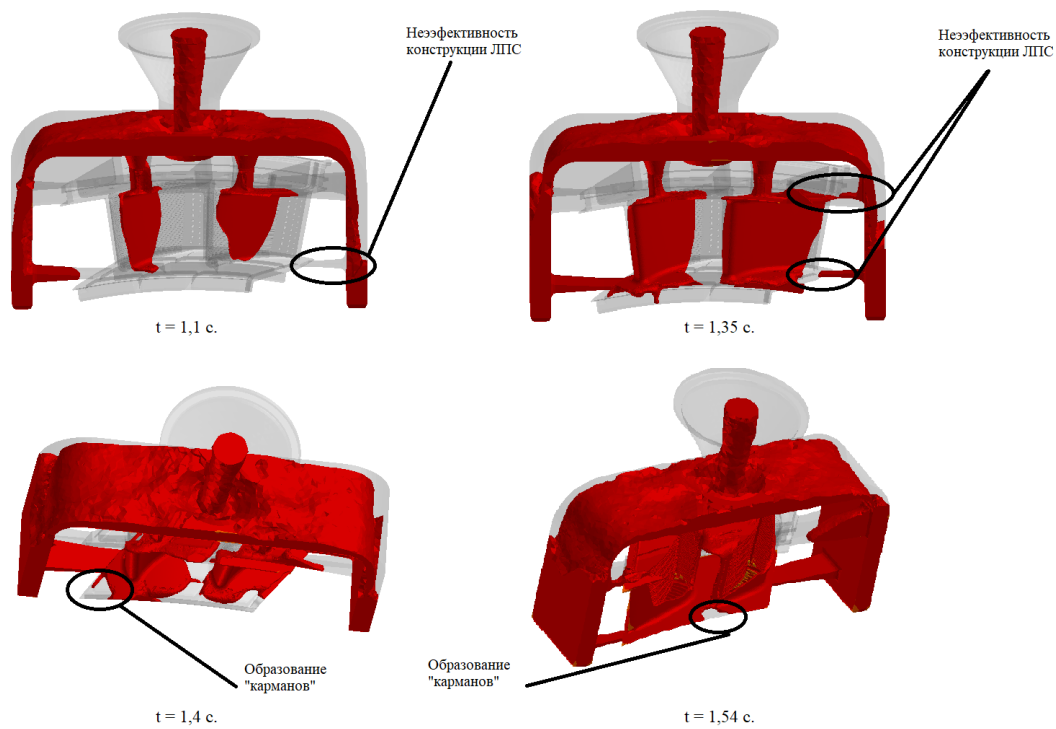


Рисунок 2.22 — Анализ характера поведения расплава металла

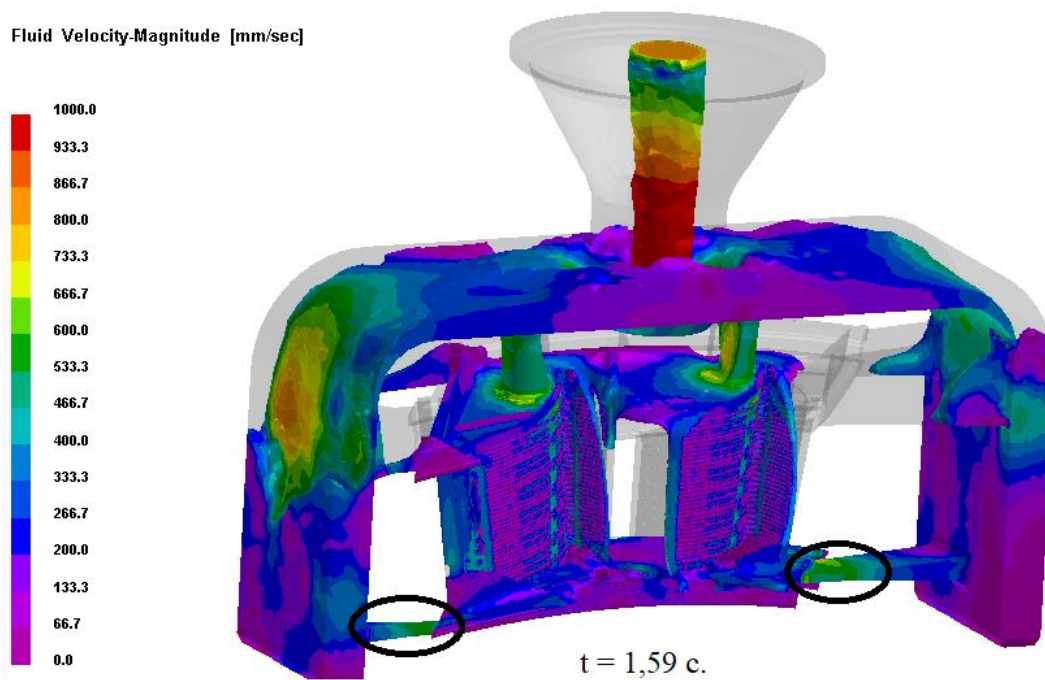


Рисунок 2.23 — Анализ скорости расплава

## 2.2.2 Анализ результатов тепловых расчетов, полученных с использованием СКМ ЛП ProCast

Тепловой модуль в ProCast (Thermal) позволяет проводить расчет тепловых потоков путем численного решения уравнения теплопроводности с учетом выделения теплоты в процессе кристаллизации. В результате расчета могут быть получены следующие типичные результаты:

- распределение температуры;
- изменение доли твердой фазы;
- тепловой поток и градиент температуры;
- время кристаллизации;
- тепловые узлы;
- прогноз пористости.

Процесс распределения температурного поля по завершении заполнения отливки расплавом и в процессе кристаллизации в различные моменты времени представлен на рисунке 2.24 а.

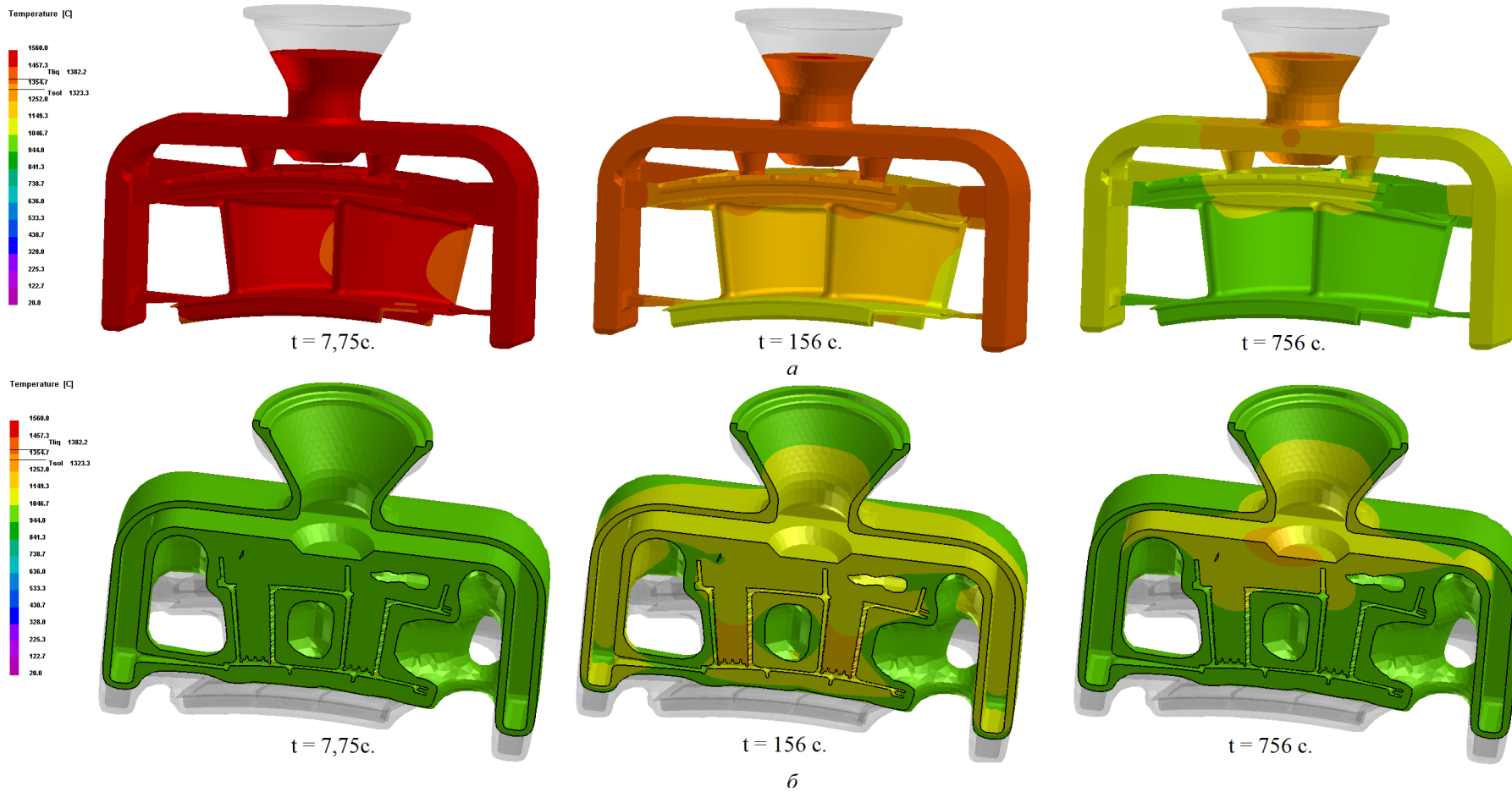
Характер распределения температурного поля керамической формы в процессе кристаллизации в различные моменты времени представлен на рисунке 2.24 б.

На основании рисунка 2.24 следует, что температурные поля в литейном блоке имеют равномерный и направленный характер: от нижней части отливки к верхней части литниково-питающей системы с одновременным распределением температур от внутренних поверхностей к наружным. Температурный фронт представляет собой набор однородных горизонтальных областей перпендикулярных вектору гравитации, последовательно сменяющих друг друга в направлении, противоположном вектору течения расплава.

Анализ результатов усадочных дефектов в отливке представлен на рисунке 2.25, согласно которому в отливке детали можно прогнозировать

появление усадочных дефектов (циклически по телу всей отливки) в соответствии с областями образования замкнутых тепловых узлов.

Оценка дефектов усадочного характера при компьютерном моделировании литейных процессов в ProCast осуществляется следующим образом: если значение дефектов до 1,5%, то можно говорить о микропористости; если значение дефектов порядка 5 – 6 %, то это пористость; если значение дефектов более 20%, то это усадочная раковина. В данном случае размер дефектов менее 2%, т.е. возможно прогнозировать в этих областях микропористость.



а – в отливке и ЛПС; б – в керамической форме

Рисунок 2.24— Характер распределения температурного поля

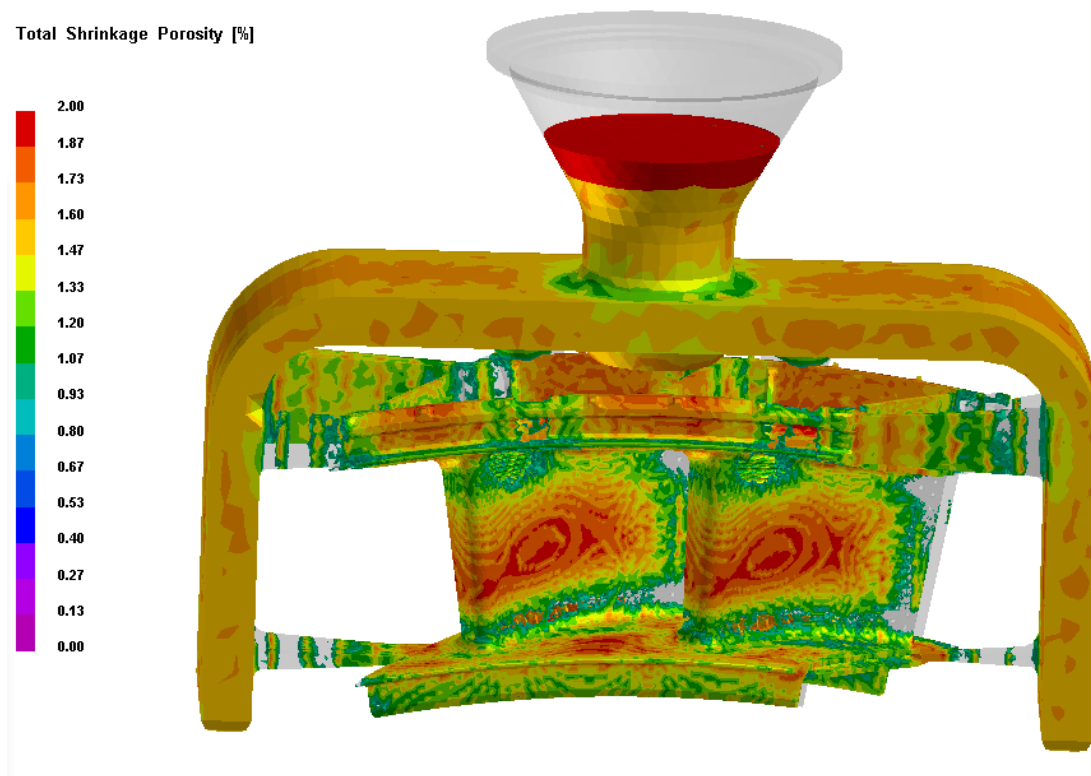


Рисунок 2.25— Характер образования пористости в отливке

### 2.2.3 Анализ результатов расчетов напряженно-деформированного состояния отливки, полученных с использованием СКМ ЛП ProCast.

Модуль Stress позволяет проводить деформационные расчеты. При этом могут быть получены следующие результаты:

- распределение напряжений;
- деформации (упругие и пластические);
- перемещения;
- образование зазоров;
- горячие трещины;
- холодные трещины.

Первым этапом анализа расчета является изучение процесса коробления литейного блока (рисунок 2.26). Анализ результатов короблений литейного блока представлен на рисунке. Данный критерий оценивает общее изменение геометрии отливки относительно номинального положения по осям X, Y и Z в процессе охлаждения металла.

Смещение геометрии вдоль оси “+X” составило примерно 0,35 мм, а смещение геометрии вдоль оси “-X” составило примерно 0,14 мм. Таким образом, суммарное изменение геометрии (коробление) по оси X составило

0,49 мм, при условии, что максимальный габаритный размер отливки по оси X составляет 148,8 мм, что соответствует уменьшению геометрии отливки по оси X на 0,34 %.

Смещение геометрии вдоль оси “+Y” составило примерно 0,009 мм, а смещение геометрии вдоль оси “-Y” составило примерно 0,14 мм. Таким образом, суммарное изменение геометрии (коробление) по оси Y составило 0,179 мм, при условии, что диаметр отливки составляет 80,7 мм, что соответствует уменьшению геометрии отливки по оси Y на 0,18 %.

Смещение геометрии вдоль оси “+Z” составило примерно 0,009 мм, а смещение геометрии вдоль оси “-Z” составило примерно 0,14 мм. Таким образом, суммарное изменение геометрии (коробление) по оси Z составило 0,149 мм, при условии, что диаметр отливки составляет 90,6 мм, что соответствует уменьшению геометрии отливки по оси Z на 0,16 %.

При условии, что отливка детали «Сопловой аппарат» не является крупногабаритной, изменение геометрических размеров по осям X, Y и Z, равное 0,49 мм, 0,179 мм и 0,149 мм соответственно, вследствие коробления является допустимым и находится в пределах допуска на исполняемый размер.

На рисунке 2.27 представлен анализ деформации литейного блока, вызванной объемной усадкой. Серым цветом обозначена исходная геометрия отливки, а красным – отливка после усадки. Для большей наглядности результаты моделирования увеличены в 10 раз, а также стрелками указано направление усадки.

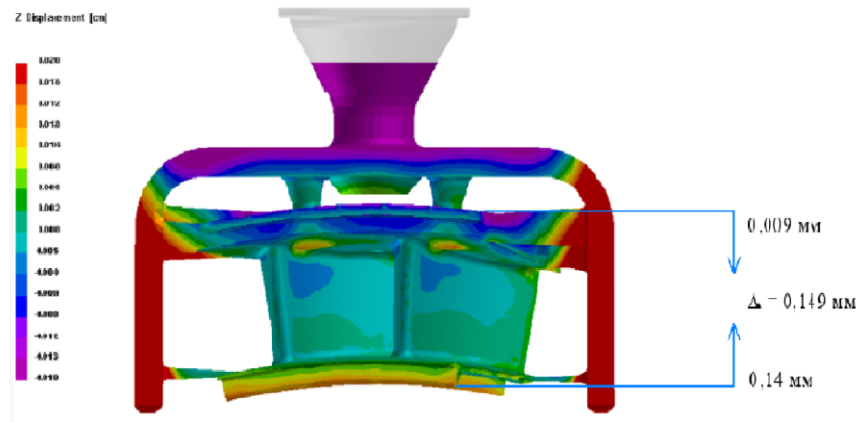
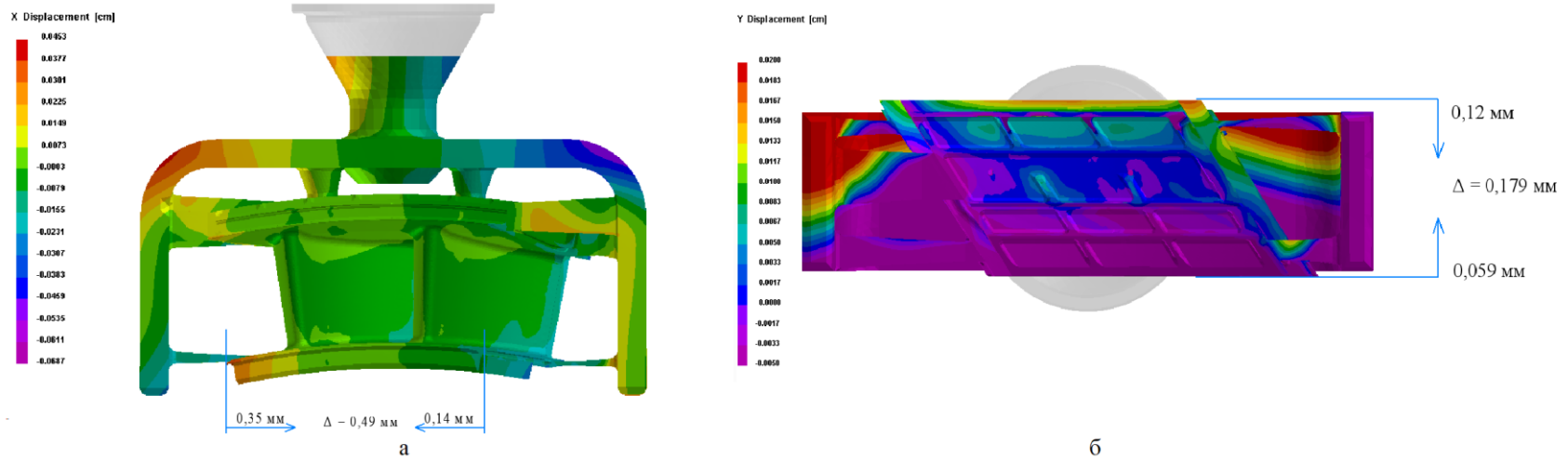


Рисунок 2.26 — Анализ коробления отливки детали относительно осей



Результаты компьютерного моделирования показывают, что усадка в целом носит неравномерный характер, однако наблюдается следующая закономерность – отливку детали «Сопловой аппарат» можно условно разделить на две области, каждая из которых характеризуется равномерным изменением геометрии в процессе термической усадки. А именно: усадка по горизонтали составляет, примерно 0,15 – 0,25 %; усадка по высоте отливки варьируется в пределах 0,2 – 0,3 %. Серией численных экспериментов было установлено, что объемная усадка каждой из областей отливки носит равномерный характер, а величина усадки изменяется в указанных пределах.

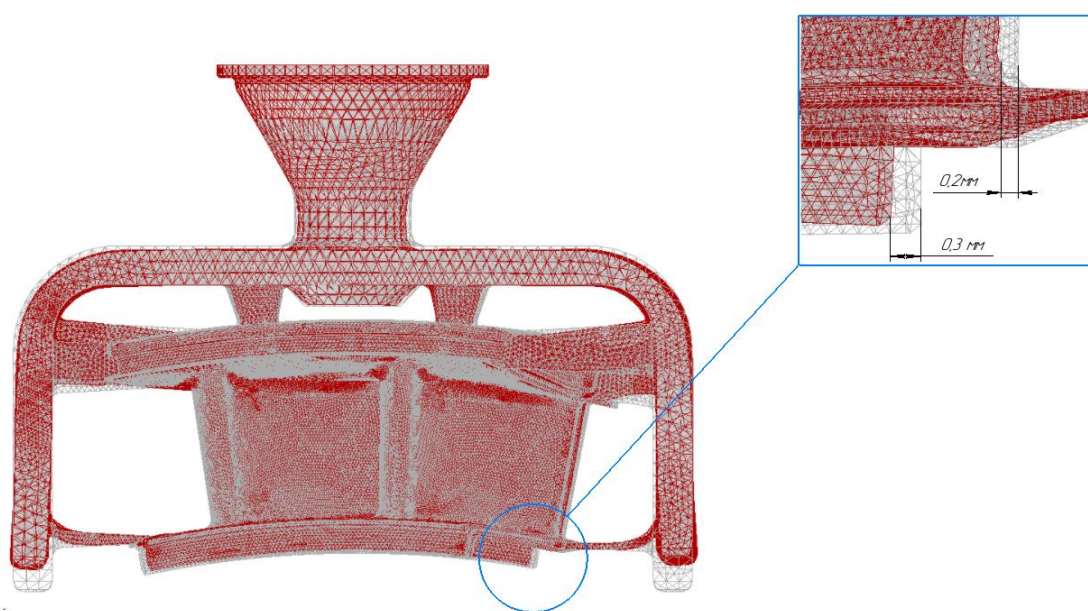


Рисунок 2.27 — Характер образования объемной усадки

#### 2.2.4 Анализ расчетов зеренной структуры в отливке

В модуле CAFÉ программного пакета ProCast можно провести моделирование конкурентного роста зерна в отливке. С целью получения наиболее адекватных результатов зеренной структуры в отливке необходимо провести серию численных исследований процесса зародышеобразования для подбора наиболее оптимальных технологических параметров.

Анализ расчетов зеренной структуры в отливке представлен на рисунке 2.28. Расчет был остановлен, после получения результатов по левому перу

сопловые аппараты, так как распространение зеренной структуры аналогично на всю отливку детали «Сопловой аппарат». На рисунке отображено множество зерен, что приемлемо для данной детали, так как «Сопловой аппарат» не воспринимает на себя высоких динамических нагрузок, то его структура может содержать множество зерен.

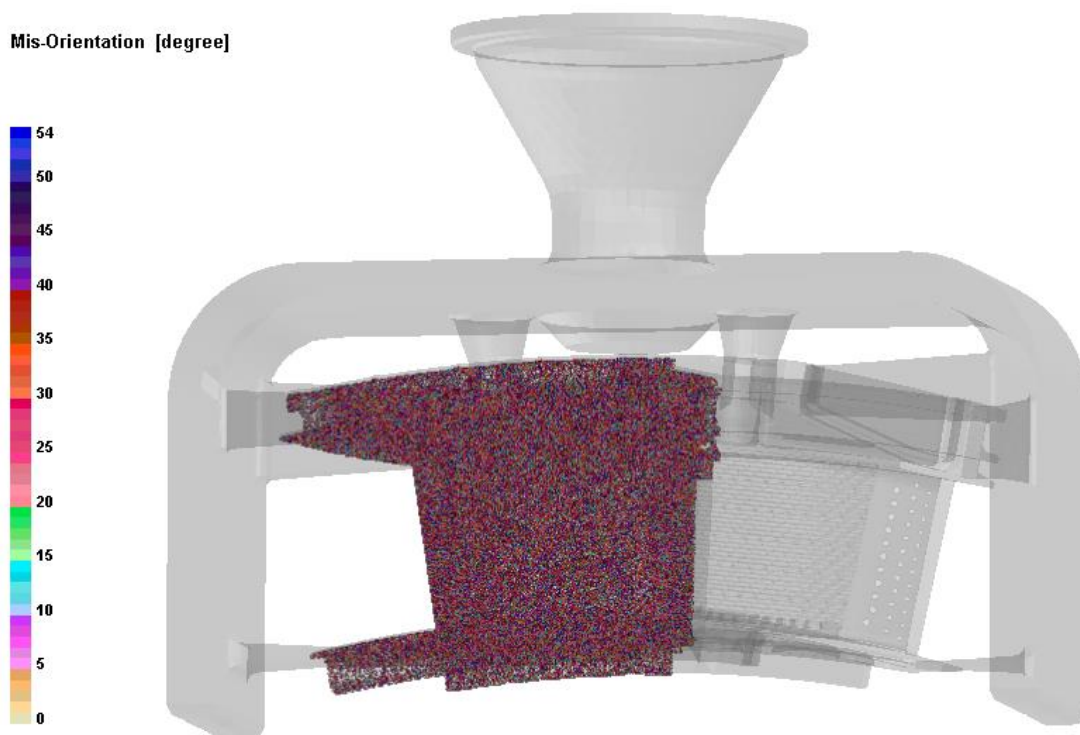


Рисунок 2.28 — Анализ расчетов зеренной структуры в отливке

Исходя из вышеперечисленных результатах можно сделать рекомендации по модернизации технологического процесса и геометрии литниково-питающей системы:

1. увеличить площадь поперечного сечения питателей;
2. добавить литейные радиусы в местах перехода от элементов литниково-питающей системы к телу отливки.

### 2.3 Проектирование модернизированного технологического процесса

Опираясь на рекомендации, сформированные на результатах расчетов, была модифицирована конструкция литниково-питающей системы. Новая

геометрия показана на рисунке 2.29. По рисунку видно, что помимо изменения геометрии основных питателей, так же были изменены «проблемные» питатели с малым поперечным сечением, для повышения эффективности работы ЛПС. Красными овалами выделены наиболее важные изменения в ЛПС.

Помимо изменения геометрических параметров литниково-питающей системы, так же были изменены параметры заливки, а именно увеличено время заполнения керамической формы расплавом с 3,06 секунды до 4,01 секунды. Это сделано для того, чтобы процесс заливки проходил по правильному плану, то есть заполнения происходило снизу вверх.

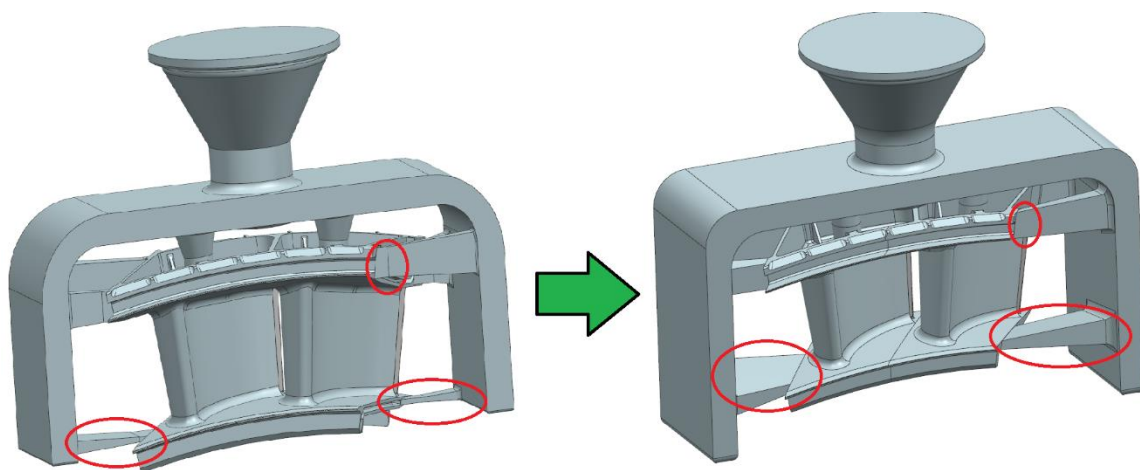


Рисунок 2.29 — Модель модернизированной литниково-питающей системы

В результате изменений в технологии процесса заливки и геометрии литниково-питающей системы были получены следующие результаты.

Улучшен процесс заливки, за счет увеличений площади поперечного сечения питателей процесс заливки происходит по «правильному» пути (рисунок 2.30), т. е. заполнение идет снизу вверх, верхние питатели не подают в отливку расплав раньше нижних, отсутствуют «карманы».

Так же в результате изменения геометрии ЛПС получилось снизить скорость течения расплава в зонах, где имеется риск повреждения керамической оболочки (рисунок 2.31). По рисунку видно, что скорость в

выделенных областях значительно снизилась, что обеспечит отсутствие повреждения элементов керамической оболочки.

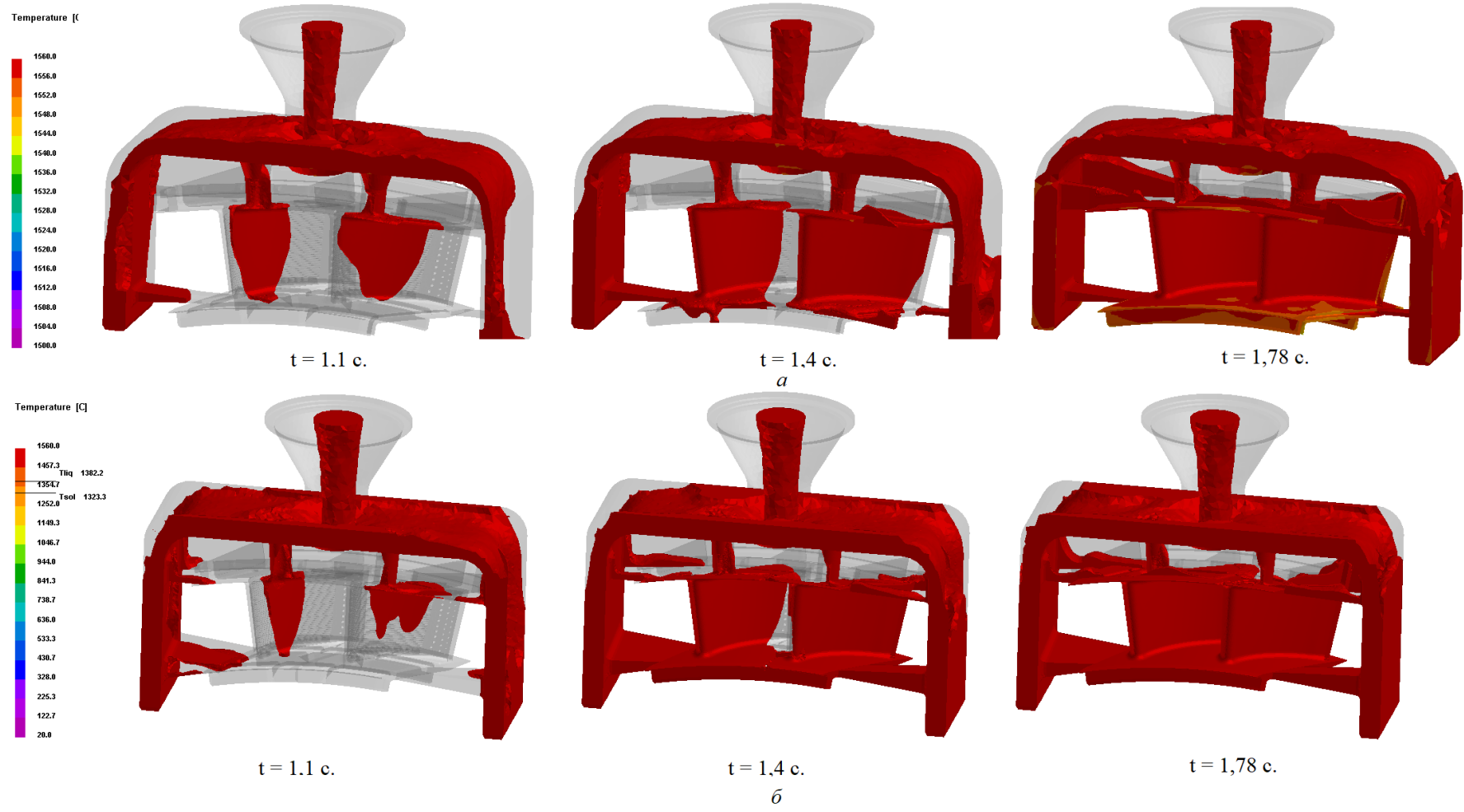
После сравнительного анализа параметров заливки двух литниково-питающих систем, необходимо оценить процентное содержание пористости. На рисунке 2.32 видно, что картина распределения и процентное содержание пористости в отливке кардинально не изменились, содержание пористости в отливке не более 2%, т. е. возможно прогнозировать в этих областях микропористость.

Так же важно сравнить характер коробления отливок базовой и модернизированной ЛПС (рисунок 3.33). Суммарное изменение геометрии (коробление) по оси X для модернизированной ЛПС составило 0,28 мм, при условии, что максимальный габаритный размер отливки по оси X составляет 148,8 мм, что соответствует уменьшению геометрии отливки по оси X на 0,19 %, при этом те же показатели для базовой ЛПС составили 0,49 мм и 0,34%. Это говорит об уменьшении смещения геометрии по оси X.

Суммарное изменение геометрии (коробление) по оси Y составило 0,43 мм, т. е. отливка уменьшилась по оси Y на 0,5 %, для базовой ЛПС этот показатель равен 0,18%.

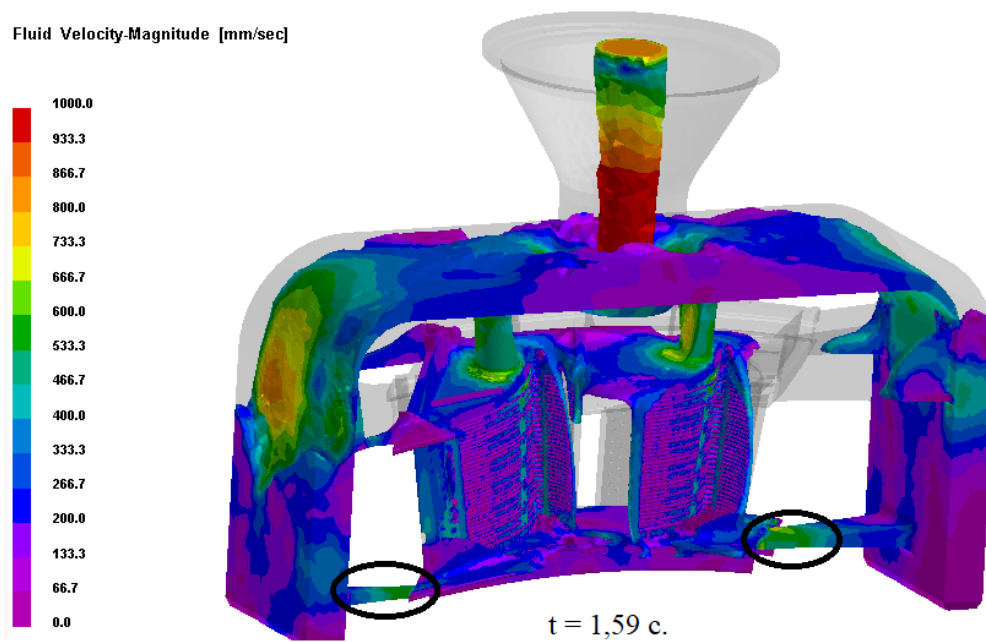
Суммарное изменение геометрии (коробление) по оси Z составило 0,28 мм, т. е. отливка уменьшилась по оси Z на 0,31 %, для базовой ЛПС данный показатель равен 0,16 %. Так же следует отметить, что изменение геометрии относительно осей для модернизированной ЛПС имеет более равномерный характер, по сравнению с базовой. В целом значения изменения геометрии находятся в пределах допуска.

На рисунке 3.34 показано сравнение характеров образования объемной усадки для базового и модернизированного ЛПС. Величины объёмной усадки двух вариантов ЛПС отличается незначительно и в целом можно считать равными друг другу.

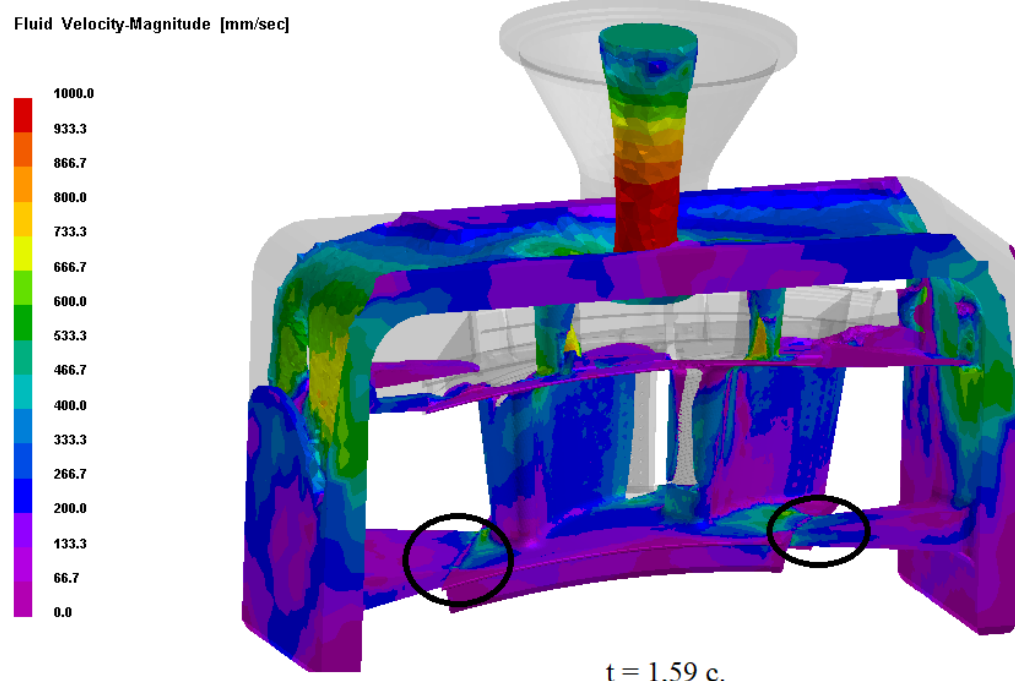


*a* – базовая ЛПС; *б* – модифицированная ЛПС

Рисунок 2.30 — Характер заполнения керамической формы расплавленным металлом в различные моменты времени



а

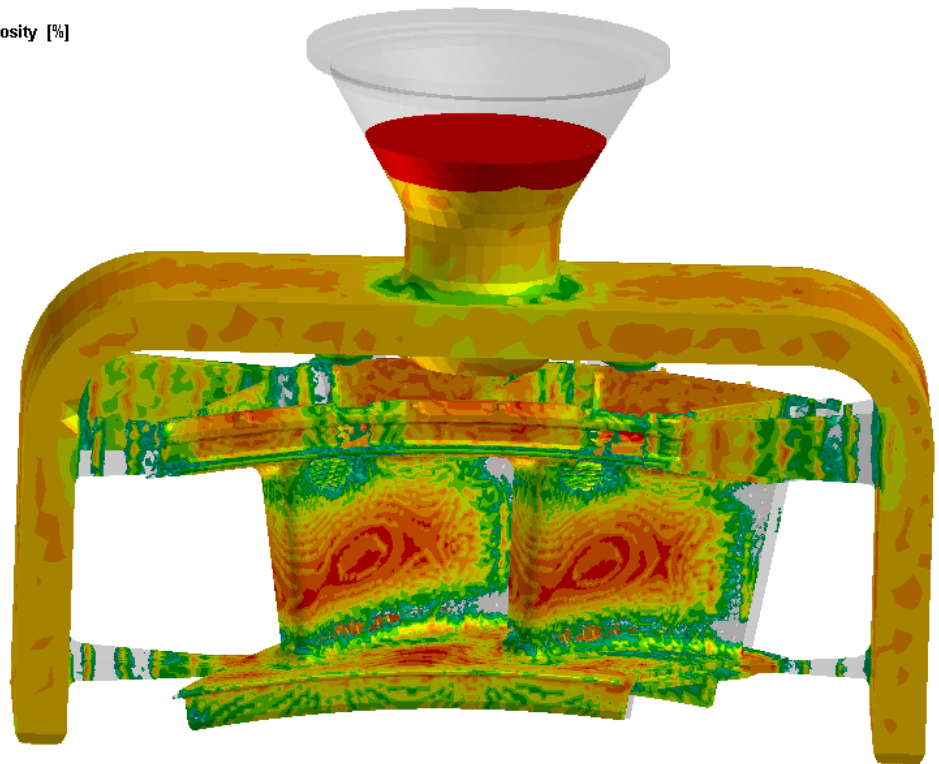
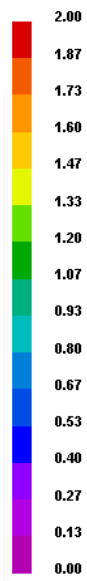


б

а – базовая ЛПС; б – модифицированная ЛПС

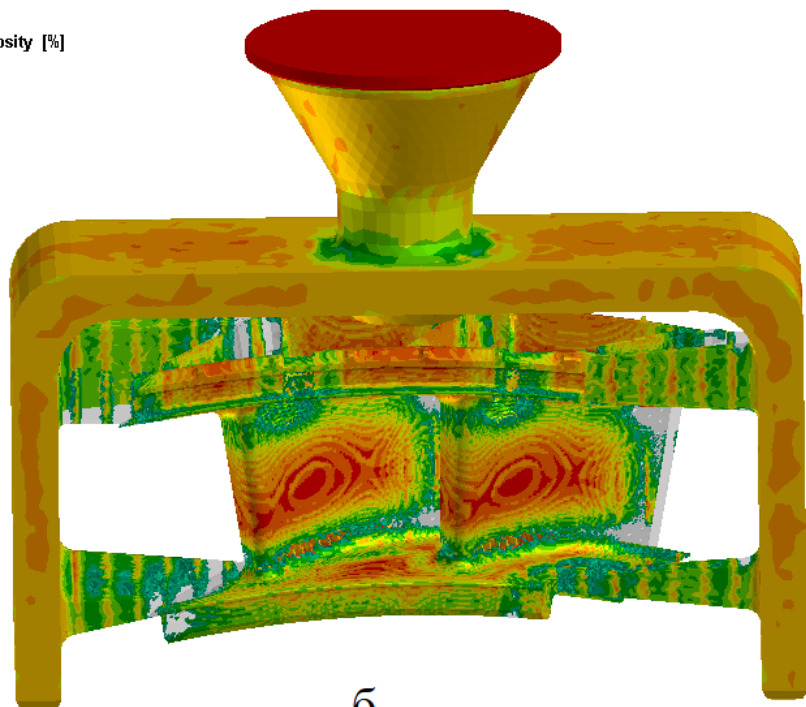
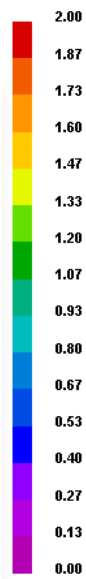
Рисунок 2.31 — Сравнительный анализ скорости расплава

Total Shrinkage Porosity [%]



а

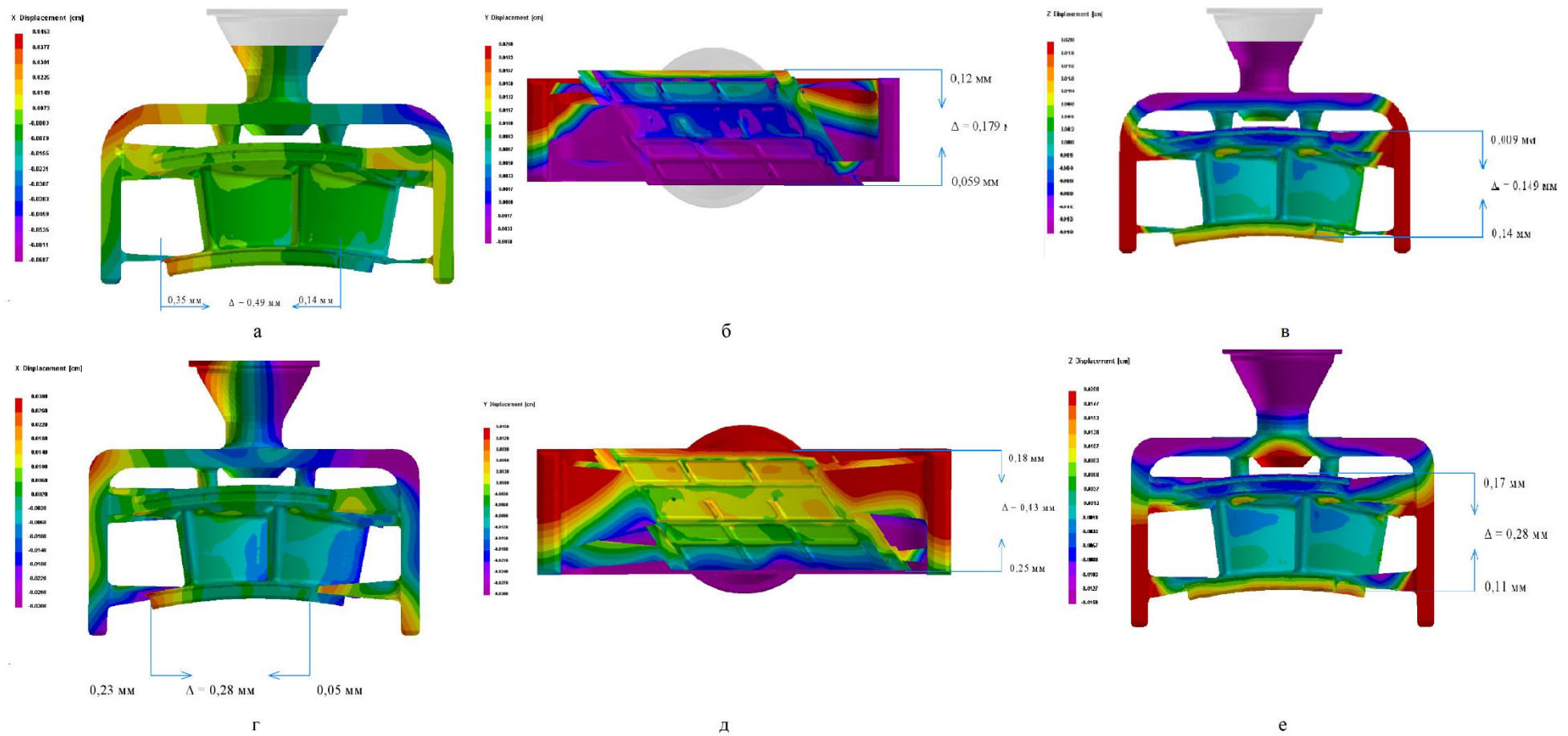
Total Shrinkage Porosity [%]



б

а – базовая ЛПС; б – модифицированная ЛПС

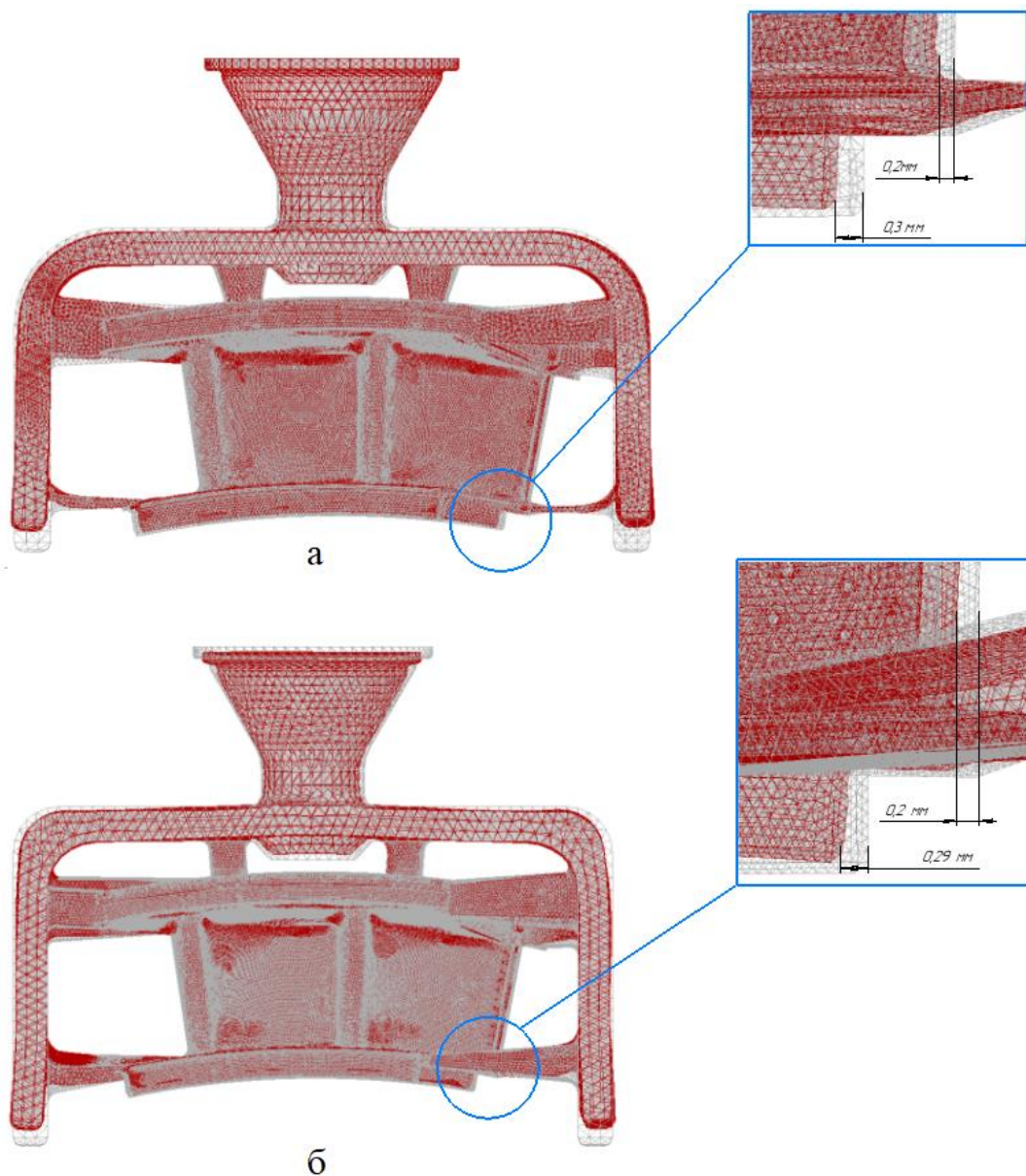
Рисунок 2.32 — Сравнительный анализ процентного содержания пористости



а – X, базовая ЛПС; б – Y, базовая ЛПС; в – Z, базовая ЛПС; г – X, модернизированная ЛПС; д – Y, модернизированная ЛПС; е – Z, модернизированная ЛПС

Рисунок 2.33 — Сравнительный анализ коробления отливки детали для двух вариантов ЛПС относительно осей





а – базовая ЛПС; б – модифицированная ЛПС

Рисунок 2.34 — Сравнительный анализ характера образования объемной усадки

## 2.4 Выводы по главе

Исходя из анализа современных систем цифрового моделирования технологического процесса литья был выбран программный продукт ProCast, исходя из его функциональных возможностей.

В ProCast был произведен расчет симуляции технологического процесса литья по выплавляемым моделям детали «Сопловой аппарат» согласно базовому технологическому процессу.

На основе результатов анализа расчетов были сформированы следующие рекомендации по модернизации технологического процесса и геометрии литниково-питающей системы:

1. увеличить площадь поперечного сечения питателей;
2. добавить литейные радиусы в местах перехода от элементов литниково-питающей системы к телу отливки.

Данные рекомендации были апробированы с помощью ProCast. Результаты расчетов подтвердили необходимость изменения геометрии ЛПС.

### 3. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ГТД ПРИ ПОМОЩИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Бурный рост авиапромышленности приводит к повышению требований к производственному процессу изготовления деталей, в том числе отливок сопловых аппаратов турбины ГТД. После требований по надежности деталей турбины ГТД, наиболее внимание оказывают требования по снижению стоимости и времени изготовления этих деталей, так как они являются наиболее трудоёмкими (до 30% от общей трудоёмкости ГТД) и дорогостоящими (до 35% от общей стоимости ГТД) деталями двигателя.

Весомый вклад в стоимость и время изготовления сопловых аппаратов турбины вносит апробирование конструкции самой сопловые аппараты и технологии её изготовления. Это связано со следующими причинами:

1. в традиционный технологический процесс изготовления сопловых аппаратов турбины входят такие пункты, как: разработка и расчёт конструкции ЛПС (вариант решения этой задачи был проработан во 2 главе), разработка технической документации на изготовление пресс-форм и изготовление самих прессформ. Процесс изготовления пресс-форм для штамповки восковых моделей отливок сопловых аппаратов турбины является сложным процесс в плане механической обработки, что в среднем требует времени на производство от 5 до 7 месяцев, при этом стоимость такой пресс-формы исчисляется в 100-ях тысяч рублей;

2. после апробирование турбины часто приходится дорабатывать конструкцию сопловых аппаратов, а соответственно делать новую пресс-форму. Данный процесс будет продолжаться до получения требуемых параметров работы сопловых аппаратов турбин, что может потребовать несколько итераций и, следовательно, несколько вариантов прессформы. Эта особенность в совокупности с высокими стоимостью и временем изготовления

пресс-форм значительно повышает трудоёмкость и стоимость изготовления сопловых аппаратов.

В последнее время, благодаря стремительному развитию аддитивных технологий, широкое применение получила технология быстрого прототипирования, которая в короткий срок и при незначительных вложениях позволяет получать восковые модели отливок с высокой точностью.

Рассмотрим технологию быстрого прототипирования более детально.

### 3.1 Сравнение методов аддитивных технологий

Технологий быстрого прототипирования в первую очередь основывается на технологии аддитивного производства. И для понимания процесса необходимо более подробно изучить аддитивные технологии.

Аддитивные технологии (AF – Additive Fabrication или AM – Additive Fabrication), или технологии послойного синтеза, - одно из наиболее динамично развивающихся направлений «цифрового» производства.

На рисунке 3.1 изображена иллюстрация к патенту Otto Munz на первый стереолитограф. Данный стереолитограф представляет собой платформу, на которой производится экспозиция. Для перемещения платформы использовался поршень, который установлен в цилиндре с возможностью перемещения. Поршень двигают на определенную величину с определенным шагом, сверху наносят эмульсионный слой и проецируют на него изображение, после чего наносят слой фиксирующего реагента. И так послойно наносят каждый фрагмент детали: поршень в нижнем положении, нанесение фотоэмульсии, засвечивание, нанесение слоя фиксирующего реагента и т.д. Фиксирующий состав наносится как на засвеченные участки, так и на не засвеченные, в таком случае конечная деталь выглядит следующим образом: внутри затвердевшего прозрачного материала, сформированного в виде цилиндра, оказывался образ трёхмерного объекта. Множество современных авторов новых изобретений в области аддитивных технологий

ссылаются на патент Otto Munz, как на предшественника современной стереолитографии.

Фотополимер — это вещество, которое меняет свои свойства под действие ультрафиолетового света, в обычном состоянии фотополимер достаточно податлив, но после воздействия ультрафиолетового излучения отвердевает.

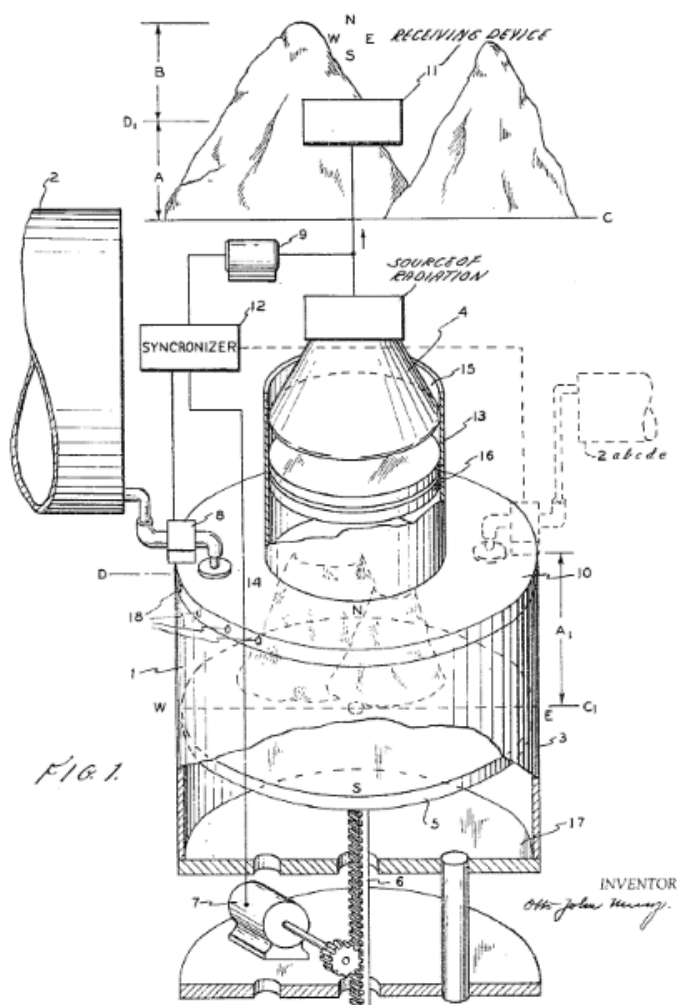


Рисунок 3.1 — Иллюстрация к патенту Otto Munz на первый стереолитограф

На данный момент различают следующую классификацию аддитивных технологий, при которой методы разделены на группы по принципу получения изделия:

1. material extrusion – получение детали по средствам выдавливание материала;
2. material Jetting – разбрызгивание материала, струйные технологии;

3. binder jetting – в данном случае также происходит разбрызгивание материала, но в отличие от предыдущего метода разбрызгивается связующий материал;

4. sheet lamination – данный метод подразумевает соединение листовых материалов;

5. vat photopolymerization – фотополимеризация в ванне, в данном случае процесс построения детали происходит путем засвечивания и последующего затвердевания фотополимерной смолы;

6. powder bed fusion – расплавление материала в заранее сформированном слое;

7. directed energy deposition – прямой подвод энергии непосредственно в место построения, данный метод принципиально отличается от предыдущего. В технология DED порошок и энергия подаются одновременно в точку спекания, то есть отсутствует заранее подготовленный слой.

Каждая группа из классификации включает в себя несколько методов послойного синтеза, которые отличаются используемыми материалами, методами подачи материала в зону построения и источником энергии, используемым для изготовления деталей. В Приложении Б показана классификация аддитивных технологий согласно стандарту ASTM F2792.

Наибольшее распространение в области быстрого прототипирования получила технология SLA. Метод SLA – лазерная стереолитография, принцип действия основан на послойном отверждении жидкого материала (фотополимерной смолы) в результате действия луча лазера.

Принцип действия данного метода показан на рисунке 3.2. Выращивание прототипа происходит на сетчатой платформе, которая помещается в ёмкость с жидким фотополимером.

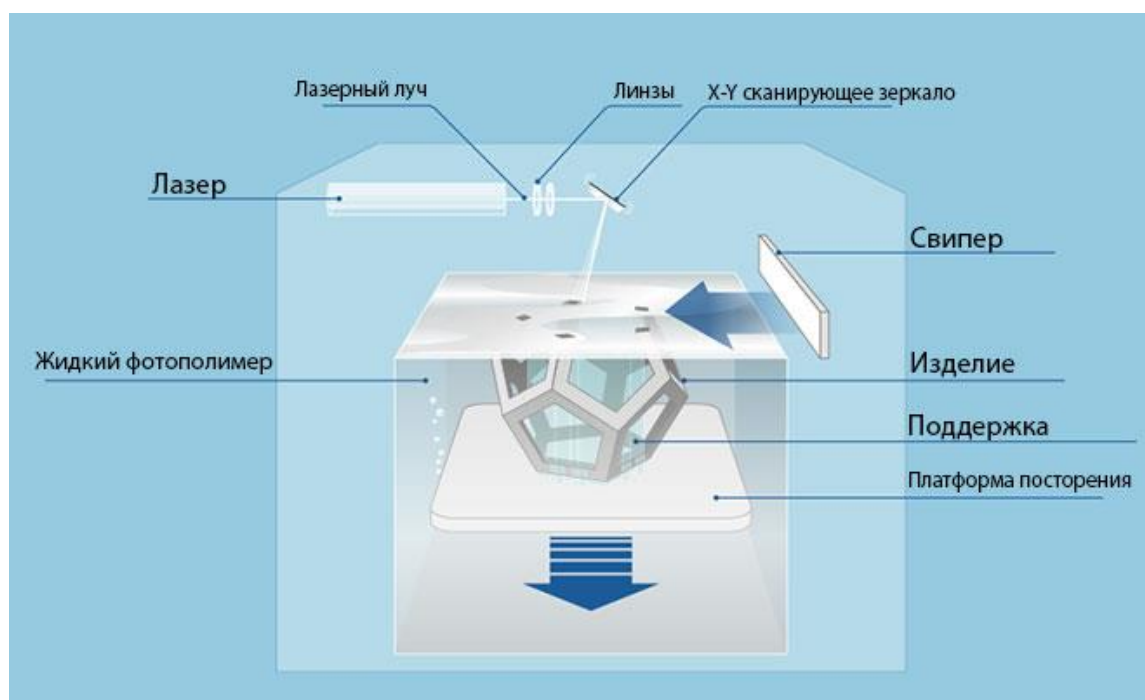


Рисунок 3.2 — Принцип работы технологии SLA

На первом этапе послойного синтеза платформа погружается в фотополимер так, чтобы толщина слоя над платформой была равна 0,05-0,13 мм – по сути это и есть толщина слоя в технологии лазерной стереолитографии. Далее в работу вступает лазер, который направленно воздействует на те участки слоя, которые соответствуют геометрии прототипа, вызывая тем самым затвердевание. Далее платформа погружается в ёмкость еще на один слой, т. е. на 0,05-0,013 мм от предыдущего положения, так же лазер воздействует на необходимые участки и данный процесс повторяется вплоть до затвердевания финального слоя.

После окончания послойного синтеза прототип погружают в ёмкость, содержащую специальный состав для удаления лишних элементов и полной очистки. SLA как и другие методы аддитивных технологий требуют возведения специальных поддерживающих структур на нависающих частях прототипа, которые в последствии удаляются вручную.

Основными преимуществами и особенностями технологии являются:

1. изготовление моделей любой сложности (тонкостенные детали, мелкие детали);

2. легкая обработка изготовленного прототипа;
3. высокая точность построения и высокое качество поверхности;
4. свойства применяемых полимеров позволяют использовать выращенный прототип в качестве готового изделия;
5. большие, чем у других 3D-принтеров, размеры рабочей камеры;
6. низкий процент расходного материала на поддержку;
7. низкий уровень шума производства деталей.

Однако существенным недостатком метода является высокая стоимость расходных материалов и наличие поддержек из основного материала.

Поэтому часто применяют технологию PolyJet, которая также основывается на стереолитографии. Технология PolyJet заключается в послойном отверждении жидкого полимера под воздействием ультрафиолетового излучения.

Принцип работы и особенности технологии PolyJet заключается в следующем (рисунок 3.3), печатающая головка оборудования послойного синтеза слоями толщиной 16/30 мкм распыляет основной материал и вспомогательный материал (поддержка) по траектории, соответствующей печатаемому слою математической модели прототипа. Совместно с нанесением материала включается ультрафиолетовая лампа, которая полимерезует светом. Благодаря такому принципу действия прототип не требует какой – либо постобработки. Необходимо только растворить материал поддержки в каустической соде или удалить потоком воды под давлением.



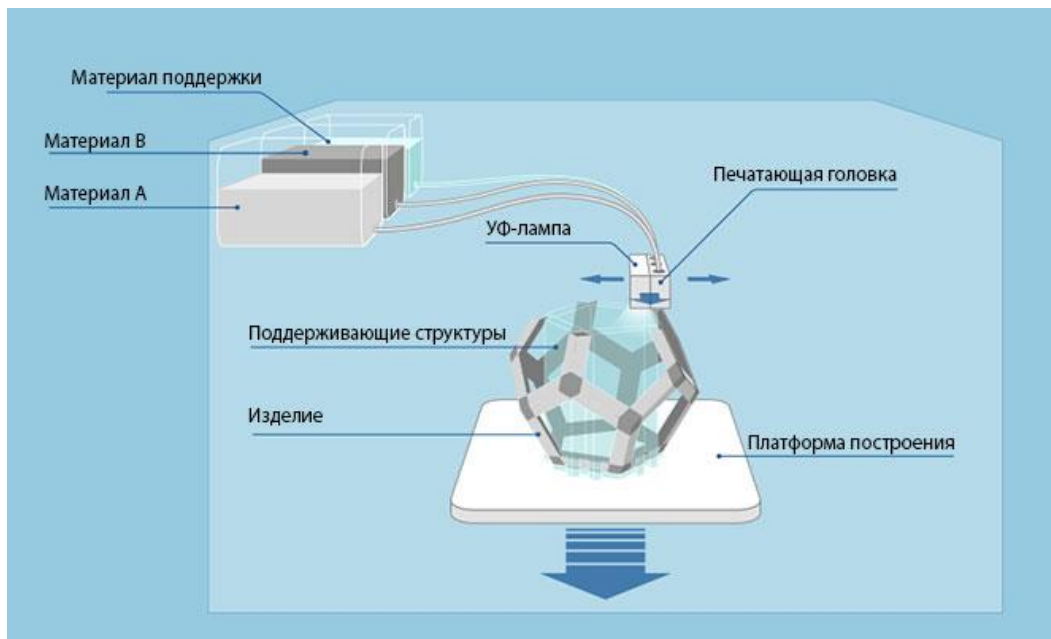


Рисунок 3.3 — Принцип работы технологии PolyJet

Основными преимуществами и особенностями технологии являются:

1. основным достоинством технологии является гладкая поверхность готовых изделий;
2. высокая точность построение в 0,02-0,085 мм для объектов размером до 50 мм, для деталей большего размера точность варьируется от 0,1 до 0,2 мм.
3. отличные физические и механические свойства прототипов (включая стабильность геометрических размеров);
4. возможность обработки поверхности (склейка, покраска и т.п.).

В работе рассмотрен 3D принтер фирмы Stratasys серии Objet модель Eden 350 (рисунок 3.4), выбор объясняется наличием его в Университете.



Рисунок 3.4 — 3D принтер Eden 350 серии Objet фирмы Stratasys

Принтер работает по технологии PolyJet технические характеристики представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 Технические характеристики 3D принтера Eden 350

Параметр	Значение
Размеры области построения (ДхШхВ)	340x340x200 мм
Размер рабочей камеры (ДхШхВ)	350x350x200 мм
Разрешение печати (XxYxZ)	600x600x100 dpi, 42x42x16 мкм
Толщина слоя	16 мкм
Параметры печатающего блока	8 печатных головок: 4 для модели и 4 для поддержки
Картриджи	2 картриджа по 3,6 кг
Габариты оборудования (ДхШхВ)	1320x990x1200 мм

### 3.2 Применение технологии быстрого прототипирования в изготовлении восковок для литья сопловых аппаратов по выплавляемым моделям

Бурное развитие в области аддитивных технологий в первую очередь значительно удешевили стоимость изготовления деталей методом послойного синтеза, при этом увеличили точность и качество поверхности прототипа. Так же уменьшилось время изготовления деталей, что делает 3D печать наиболее быстрым способ получения изделия.

К сожалению, на данном этапе имеющиеся методы послойного синтеза не позволяют получать сопловые аппараты турбин, которые можно было бы использовать непосредственно на газотурбинных двигателях. Хотя такие испытания уже проводятся и с переменным успехом, но надежность таких сопловых аппаратов крайне мала, при этом мощностей оборудования послойного синтеза не хватает для серийного изготовления сопловых аппаратов турбины и стоимость изготовления не оправдывает использования аддитивных технологий в изготовлении конечного продукта.

Но метод послойного синтеза нашёл свое применение в технологическом процессе изготовления отливок сопловых аппаратов турбины ГТД. Для понимания принципа работы технологии быстрого прототипирования рассмотрим более детально технологический процесс изготовления отливок сопловых аппаратов турбин (таблица 3.2), который описывался ранее в 1-ой главе (приложение А).

Таблица 3.2 Укрупненный технологический маршрут изготовления отливки

№	Наименование операций
Оп. 5	Разработка чертежей и общие технологические указания
Оп. 10	Изготовление пресс-форм
Оп. 15	Изготовление моделей сопловых аппаратов
Оп. 20	Контроль моделей сопловых аппаратов и литниковой системы
Оп. 25	Сборка моделей в блоки
Оп. 30	Контроль блоков моделей
Оп. 35	Подготовка и приготовление огнеупорной суспензии
Оп. 40	Подготовка электрокорунда для обсыпки блоков моделей сопловых аппаратов
Оп. 45	Подготовка блоков под формовку
Оп. 50	Формовка блоков моделей
Оп. 55	Сушка каждого отдельного слоя
Оп. 60	Контроль формовки всех слоев
Оп. 65	Зачистка литниковой чаши
Оп. 70	Удаление модельной массы из форм
Оп. 75	Прокалка форм
Оп. 80	Плавка сплавов и заливка форм
Оп. 85	Выбивка отливок
Оп. 90	Маркировка сопловых аппаратов и образцов
Оп. 95	Правление сопловых аппаратов для технологического контроля плавки
Оп. 100	Контроль качества сопловых аппаратов

Значительные недостатки в традиционном технологическом процессе изготовления отливок сопловых аппаратов турбины имеются в операции 5. Процесс изготовления пресс-форм для производства восковок отливок является весьма трудоёмким процессом и длится от 6 до 7 месяцев с момента разработки документации готовой пресс формы, при этом стоимость изготовления пресс-форм исчисляется в 100-ях тысяч рублей.

Во время производства опытных образцов газотурбинных двигателей, конструкция и технологический процесс изготовления сопловых аппаратов турбины могут меняться, что приводит к разработке и изготовлению новых пресс-форм, а соответственно к длительному ожиданию модернизированных восковок и повышению стоимости изготовления самих сопловых аппаратов.

С целью сокращения времени и затрат на получения восковок отливок сопловых аппаратов турбины при опытном производстве (на ранних стадиях производства ГТД) применяют технологии быстрого прототипирования. В таком случае происходит изменение операции № 5, 10 и 15 традиционного технологического процесса, то есть операции, связанные с изготовлением восковок (рисунок 3.5).

Рассмотрим основные этапы изготовления восковок при применении технологии быстрого прототипирования:

1. Первым этапом процесса изготовления восковок сопловых аппаратов турбины является построение матер-модели сопловые аппараты турбины в CAD/CAM/CAE системе по чертежам. При этом необходимо учитывать ряд особенностей таких, как: припуски на механическую обработку, усадку в процессе изготовления восковок и при кристаллизации отливки.

2. После построение объемной модели её изготавливают на 3D принтере. Для печати мастер-модели, как говорилось ранее, был применен 3D принтер фирмы Stratasys Eden 350, работающий на технологии PolyJet (рисунок 3.6). После печати мастер-модель выдерживают в каустической соде, затем отмывают от остатков материала поддержки под давлением водой.

Далее производят механическую полировку трактовых поверхностей мастер-модели и контроль формы и расположения на координатно-измерительной машине (КИМ).

Оп.10	Изготовление пресс-форм
Оп. 15	Изготовление моделей лопаток
Оп. 20	Контроль моделей лопаток и литниковой системы



Оп.10	Изготовление мастер-модели восковки отливки лопатки турбины
Оп. 15	Изготовление силиконовой пресс-формы
Оп. 20	Изготовление восковых моделей

Рисунок 3.5 —Внедрение технологии быстрого прототипирования в традиционный технологический процесс изготовления отливок сопловых аппаратов турбины ГТД

3. Далее на подготовленную мастер-модель закрепляют технологические элементы литниково-питающей системы (ЛПС): питатели и выпоры, роль которых выполняют пластиковые прутки нужного диаметра и длины. Далее выбирают системы разъема и помечают стикерами, для облегчения процесса разрезания будущей силиконовой формы. ЛПС закрепляют в короб из органического стекла и заливают в вакуумной установке силиконом. После заливки форма помещают в печь с температурой 40 °С для отвердевания силикона. После застывания, силиконовую форму разрезают по заранее заготовленному сечению, удаляют мастер-модель, которая может использоваться многократно, очищают от остатков ЛПС.

4. Завершающим этапом является заливка силиконовой пресс-формы воском. После заливки воск остужается и затвердевает при комнатной температуре. Далее форма разбирается, извлекается восковая модель, которую необходимо очистить от остатков ЛПС, как и саму форму.

### 3.2.1 Проектирование 3D модели для изготовления мастер-модели

Процесс проектирования 3D модели является наиболее важным этапом в процессе изготовления восковок методом быстрого прототипирования, так как на этом этапе закладываются все припуски и усадки, появляющихся на различных этапах в процессе изготовления, такие как: печать мастер-модели, заливка силиконовой пресс-формы воском и кристаллизация отливки [33]:

$$L_B = L_M - L_M \cdot \beta = L_M(1 - \beta);$$

$$L_L = L_B - L_B \cdot \alpha = L_B(1 - \alpha) = L_M(1 - \alpha)(1 - \beta);$$

$$L_L = L_M - L_M(\alpha + \beta) - L_M \cdot \alpha\beta,$$

где,  $\alpha$  – коэффициент усадки металла,  $\beta$  – коэффициент усадки воска,  $L_B$  – габаритный размер восковки,  $L_L$  – габаритный размер отлитой сопловой аппараты,  $L_M$  – габаритный размер выращенной модели.

Проектирование мастер-модели производилось в программном пакете Siemens NX.

3D модель соплового аппарата турбины ГТД необходимо сохранить в формате STL (*stereolithography*), которое распознает применяемое оборудование – 3D принтер Eden 350.

### 3.2.2 Изготовление мастер-модели соплового аппарата турбины

По завершении процесса моделирования мастер-модели и экспорта в формат STL, файл загружают в программе Objet Studio. Программное обеспечение необходимо для подбора оптимального положения детали на платформе 3D принтера (рисунок 3.6), которое обеспечивает оптимальные параметры печати (скорость, расход материала), так же в программе происходит разбиение 3D модели на слои, равные 16 мкм. Для понимания параметров печати программа Objet Studio указывает примерное время печати, расход основного материала - Full Cure 720, и вспомогательного материала - Full Cure 750.

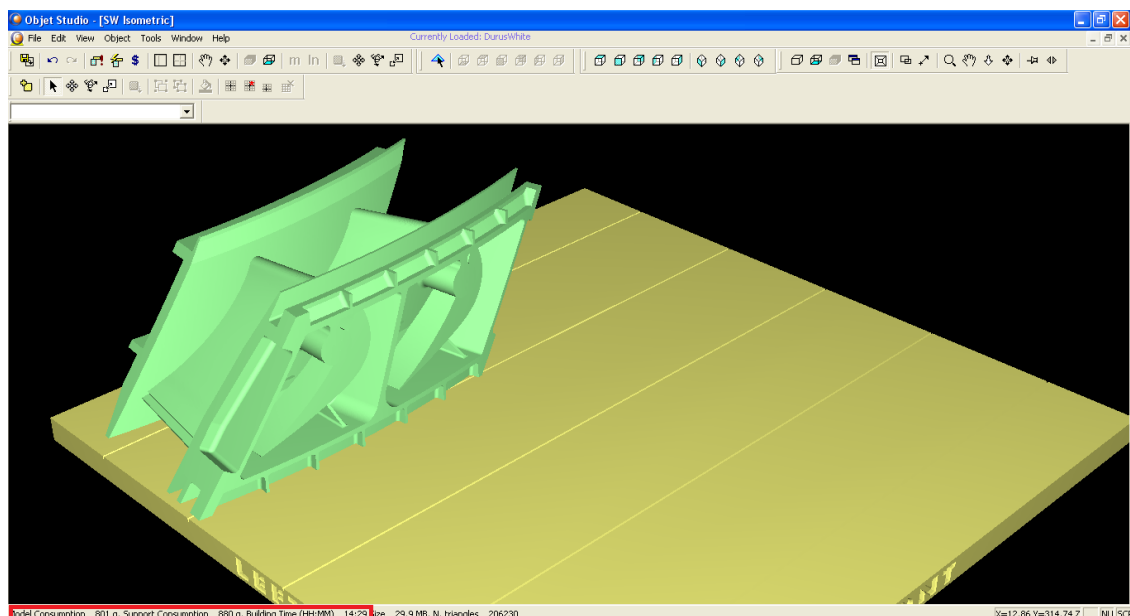


Рисунок 3.6 — Размещение мастер-модели на платформе

После процедуры настройки параметров печати, полученную модель экспортируют в формате .oft и открывают файл в программном модуле Job Manager, с помощью которого запускает процесс печати на принтере Eden 350 (рисунок 3.5).

После того, как мастер-модель напечаталась, её снимают с печатной платформы принтера и погружают в раствор каустической соды в концентрации 10% на несколько часов. После выдержки в растворе каустической соды деталь отмывают водой под высоким давлением от остатков вспомогательного материала на установке Objet Water (рисунок 3.7)



Рисунок 3.7 —Установка для промывки 3D модели Objet Water

После промывки мастер-модели необходимо провести механическую обработку: ручная полировка трактовых поверхностей соплового аппарата. Готовая мастер-модель представлена на рисунке 3.8.

Завершающим этапом изготовления мастер-модели соплового аппарата первой ступени турбины ГТД является контроль геометрии детали на координатно-измерительной машине (КИМ) DEA GLOBAL Performance 07.10.07 с целью исключения брака на этапе изготовления мастер-модели. Измерения проводятся при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  и относительной влажности 80% (рисунок 3.9). При работе использовали специализированное ПО PC-DMIS CAD ++ Ver. 4.3 MR1.



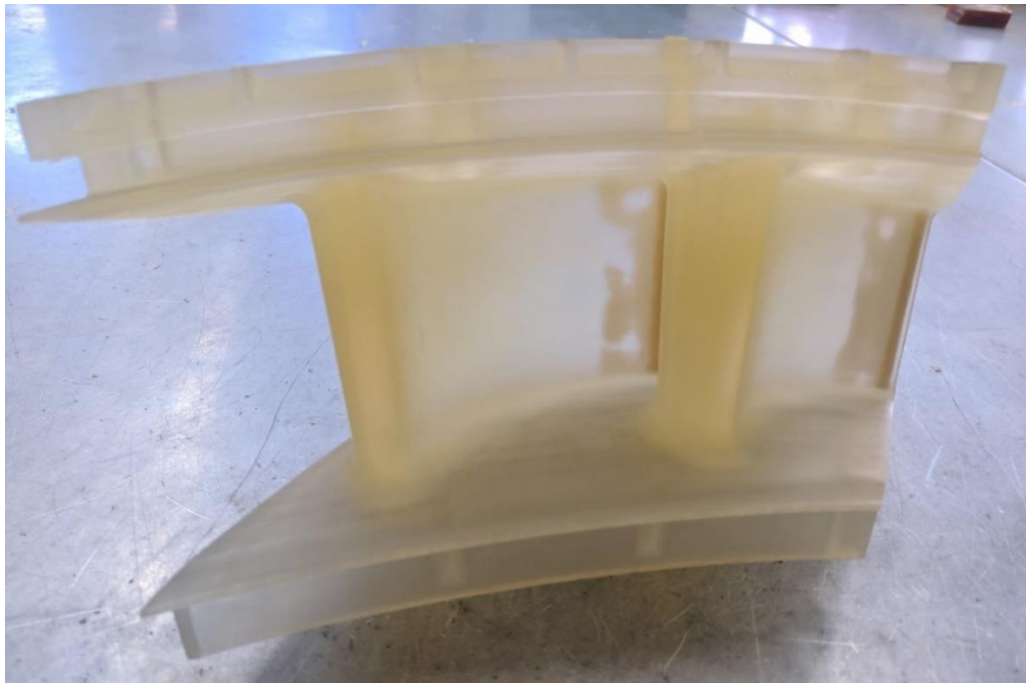


Рисунок 3.8— Мастер-модель соплового аппарата турбины ГТД первой ступени



Рисунок 3.9 — Координатно-измерительной машине (КИМ) DEA GLOBAL Performance 07.10.07

### 3.2.2 Изготовление силиконовой формы и получение восковых моделей

Первым этапом изготовления силиконовой пресс-формы является проектирование и сборка литниково-питающей системы. Выбор геометрии литниково-питающей системы, количество и место расположение питателей и выпоров делается на основании опытов, полученных при изготовлении других ЛПС. Выпоры и питатели изготавливаются из пластиковых прутков необходимого диаметра и длины и прикрепляются к мастер-модели при помощи суперклея. Параллельно прорабатываются сечения линий разъемов и отмечаются специальным техническим скотчем, чтобы позднее, при разрезе пресс-формы, были четко видны линии разреза, а процесс был значительно легче.

После того, как литниково-питающая система была собрана и были проклеены скотчем линии разъема, производят сборку герметичного короба из оргстекла при помощи термоклей. Внутренний объем короба соответствует габаритам и внешней геометрии пресс-формы.

После сборки, в короб помещают мастер модель и получившуюся систему размещают в вакуумной установке МТТ С 5/04 (рисунок 3.10) для последующей заливки жидким силиконом. Силикон изготавливают путем смешения в вакуумной установке МТТ С 5/04 компонентов А и Б компаунда «Пентэласт-750» в течение 5 минут. Для предотвращения попадания пузырьков воздуха в пресс-форму и её не пролива, после перемешивания силикон подвергают 8-ми минутной вакуумации при комнатной температуре. Затем производят заливку систему силиконом и последующую повторную вакуумацию.

После чего залитый короб помещают в термошкаф, где застывает в процесс выдержки при температуре 40 °С в течение 4 часов. После того как силикон застыл производят разбор короба и разрезка пресс-формы по заранее подготовленным линиям разреза. Далее разбирают пресс-форму, извлекают

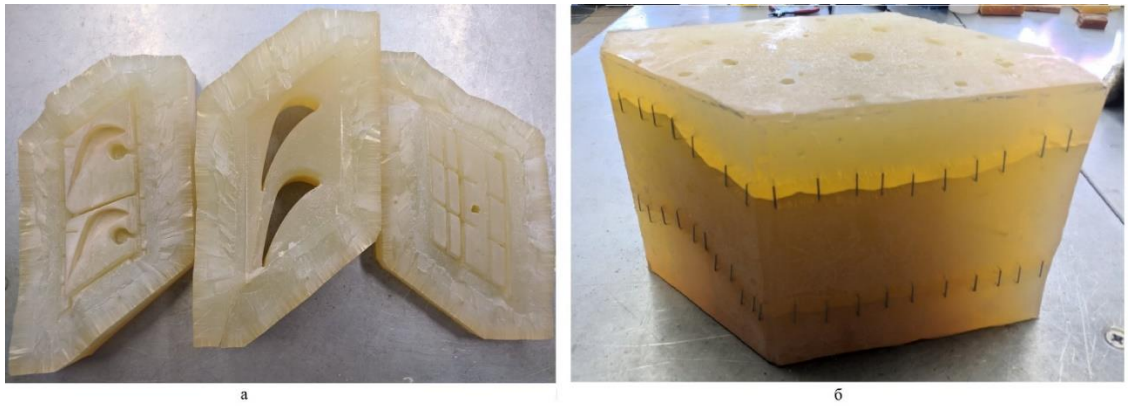
мастер-модель и остатки литниково-питающей системы и продувают сжатым воздухом пресс-форму (рисунок 3.11).



Рисунок 3.10 — Вакуумная установка для литья МТТ С 5/04

Следующим этапом в процесс изготовления восковок является подготовка пресс-формы к заливке воском. Сначала форму в разобранном виде необходимо выдержать в термошкафу при температуре 80 °С в течение 2-ух часов. Далее необходимо собрать форму и скрепить её части между собой скобами. В это же время в вакуумной машине топится воск в термочаше.

После всех подготовительных процедур пресс-форму устанавливают в вакуумной машине и процесс заливки воском схож с процессом заливки силиконом. Первым этапом производят вакуумирование в течение 20 минут после чего воск заливают в пресс-форму.



а – в разобранном виде; б – в собранном виде

Рисунок 3.11 — Силиконовая пресс-форма для изготовления восковок

После заливки силиконовую форму помещают на воздухе для её дальнейшего остывания и затвердевания воска. Далее пресс-форму разбирают и извлекают восковку. Перед тем как восковку отдать на визуальный контроль и контроль геометрических параметров её необходимо зачистить от остатков литниково-питающей системы. Готовая восковка сопловые аппараты соплового аппарата первой ступени турбины ГТД показана на рисунке 3.12.

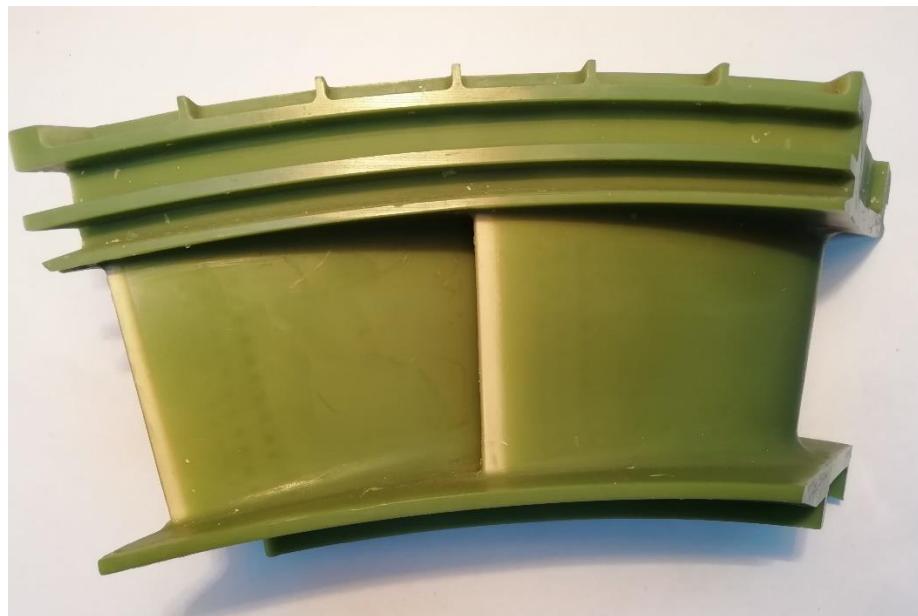


Рисунок 3.12 — Восковая модель отливки соплового аппарата

На этом процесс изготовления восковок заканчивается, в приложении В показан технологический процесс изготовления сопловых аппаратов

соплового аппарата первой ступени турбины ГТД с использованием технологии быстрого прототипирования.

### 3.3 Выводы к главе

В процессе анализа современных методов изготовления деталей и прототипов изделий при помощи аддитивных технологий и разработки технологического процесса изготовления восковок отливок сопловых аппаратов соплового аппарата первой ступени турбины ГТД были сделаны следующие выводы:

1. В настоящее время в мире идет бурное развитие технологии быстрого прототипирования. Количество вариантов технологии послойного синтеза позволяет выбрать необходимый метод 3D печати основываясь на таких параметрах, как: используемые материалы, скорость печать, стоимость расходных материалов и самого оборудования, качество получаемой поверхности и точность геометрии. В итоге был выбран метод PolyJet и принтер Eden 350;

2. Был разработан и апробирован технологический процесс изготовления восковок сопловых аппаратов соплового аппарата первой ступени турбины ГТД;

3. Преимуществами данного технологического процесса является высокая скорость получения восковок, относительно традиционного технологического процесса. Первая восковка была готова через 10 рабочих дней по сравнению с традиционным, где на изготовление первой восковки уйдет от 6 до 7 месяцев;

4. Так же был произведен контроль геометрических параметров на координатно-измерительной машине восковок и мастер-модели, который показал высокую точность рассматриваемого метода;

5. Недостатками технологии быстрого прототипирования является короткий срок службы силиконовой пресс-формы – не более 100 заливок,

после чего невозможно обеспечить требования по высокой точности геометрии;

6. Необходимо провести оценку экономической эффективности применения технологии быстрого прототипирования в технологическом процессе изготовления отливок сопловых аппаратов соплового аппарата первой ступени турбины ГТД.

## 4 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ВОСКОВЫХ МОДЕЛЕЙ СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ ТУРБИНЫ ПРИ ПОМОЩИ ТЕХНОЛОГИИ БЫСТРОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ

Внедрение технологии быстрого прототипирования в технологический процесс изготовления отливок сопловых аппаратов соплового аппарата первой ступени турбины ГТД позволяет в значительной степени сократить временные затраты на подготовку восковок и отработку конструкции и технологического процесса литья отливок сопловых аппаратов. При этом необходимо учитывать важность экономической эффективности применения данной технологии. Для этого целесообразно провести сравнительный анализ себестоимости изготовления восковых моделей в условиях реализации аддитивных технологий и с помощью традиционной технологии изготовления. Существуют различные методики по расчету экономической эффективности научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок [59], опираясь на которые и был построен данный расчет.

### 4.1 Экономический расчет изготовления восковых моделей в условиях реализации аддитивного производства

#### 4.1.1 Стоимость печати прототипа детали

Количество основного материала необходимого для печати рассчитывается следующим образом [60]:

$$C_{\text{осн.мат.}} = K_{\text{осн.мат.}} \times C_{\text{осн.мат.}} \times k, \quad (4.1)$$

где  $K_{\text{осн.мат.}}$  – количество основного материала;  $C_{\text{осн.мат.}}$  – цена материала, руб./кг;  $k$  – коэффициент, корректирующий материал в процессе работы, принимается равной 1,05.

В данном случае, для выращивания прототипа в качестве основного материала использовали FullCure 720, необходимое количество основного

материала определяется с помощью программы *Objet Studio*, который учитывает коэффициент усадки. Таким образом:  $K_{\text{осн.мат}} = 0,801$  ,  $\text{Ц}_{\text{осн.мат}} = 34000$  руб/кг. Следовательно,

$$C_{\text{осн.мат.}} = K_{\text{осн.мат}} \times \text{Ц}_{\text{осн.мат}} \times k = 0,801 \times 34000 \times 1,05 = 28595,7 \text{ руб.}$$

По похожей формуле рассчитывается количество вспомогательного материала необходимого для выращивания:

$$C_{\text{всп.мат}} = K_{\text{всп.мат}} \times \text{Ц}_{\text{всп.мат}} \times k, \quad (4.2)$$

где  $K_{\text{всп.мат}}$  – количество вспомогательного материала, кг;  $\text{Ц}_{\text{всп.мат}}$  – цена материала, руб./кг;  $k$  – коэффициент, корректирующий материал в процессе работы, принимается  $k = 1,05$ .

В качестве вспомогательного материала для выращивания прототипа был выбран *FullCure 705*, его необходимое количество определяется с помощью программы *Objet Studio* с учетом коэффициента усадки. В нашем случае:  $K_{\text{всп.мат}} = 0,093$  кг,  $\text{Ц}_{\text{всп.мат}} = 32000$  руб/кг.

$$C_{\text{всп.мат}} = K_{\text{всп.мат}} \times \text{Ц}_{\text{всп.мат}} \times k = 0,880 \times 32000 \times 1,05 = 29568 \text{ руб.}$$

Рассчитаем стоимость работы оборудования по формуле (4.3):

$$C_{\text{раб.обор.}} = \frac{K_{\text{ч}}}{60} \times \text{Ц}_{\text{ч}}, \quad (4.3)$$

где  $K_{\text{ч}}$  - время, затрачиваемое на выращивание прототипа, мин;  $\text{Ц}_{\text{ч}}$  – стоимость 1 часа работы оборудования, руб/час. Для выращивания прототипа используется 3D-принтера *Objet EDEN*, стоимость одного часа работы на нем составляет  $\text{Ц}_{\text{ч}} = 500$  руб/час. Время выращивания – рассчитывается с помощью программы *Objet Studio* и составляет 14,5 часов. Тогда:

$$C_{\text{раб.обор}} = 14,5 \times 500 = 7250 \text{ руб.}$$

Заработная плата  $З_{\text{раб}}$  оператора рассчитывается из условия 300 руб/ч. Время работы оператора 2 час. Следовательно, в нашем случае:



$$Z_{\text{раб}} = 300 \times 2 = 600 \text{ руб}$$

Для более точного расчета необходимо так же учесть размер страховых выплат, накладные расходы и заложить прибыль.

Тарифы страховых взносов в 2020 году установлены законодательством в размере 30% к фонду заработной платы. В них входят: обязательное пенсионное страхование (ОПС) в размере 22,0 %, обязательное социальное страхование на случай временной нетрудоспособности и в связи с материнством (ОСС) – 2,9 %, обязательное медицинское страхование (ОМС) – 5,1 % [61].

В связи с тарифами страховые выплаты рассчитываются по формуле (4.4):

$$Z_{\text{страх.}} = 0,3 \times Z_{\text{раб.}}, \quad (4.4)$$

где  $Z_{\text{раб}}$  – заработная плата оператора.

Таким образом, страховые выплаты составят:

$$Z_{\text{страх.}} = 0,3 \times 600 = 180 \text{ руб.}$$

Себестоимость печати прототипа складывается из суммы всех ранее перечисленных затрат, формула (4.5):

$$C = C_{\text{осн.мат}} + C_{\text{всп.мат.}} + C_{\text{раб.обор.}} + Z_{\text{раб}}, \quad (4.5)$$

И составляет:

$$C = C_{\text{осн.мат}} + C_{\text{всп.мат.}} + C_{\text{раб.обор.}} + Z_{\text{раб}} = 28595,7 + 29568 + 7250 + 600 = 66013,7 \text{ руб.}$$

Для вычисления накладных расходов воспользуемся формулой (4.6):

$$P_{\text{нак}} = 0,17 \times C, \quad (4.6)$$

Следовательно, получим следующее значение:

$$P_{\text{нак}} = 0,17 \times 66013,7 = 11222,33 \text{ руб.}$$

На прибыль закладывается 10% и рассчитываем по формуле (4.7):

$$П = 0,1 \times C = 0,1 \times 66013,7 = 6601,37 \text{ руб.} \quad (4.7)$$

Значит, цена на изготовления прототипа детали с учетом накладных расходов и прибыли изменится, формула (4.8):

$$Ц = C_{\text{осн.мат}} + C_{\text{всп.мат.}} + C_{\text{раб.обор.}} + Z_{\text{раб}} + Z_{\text{страх}} + P_{\text{нак}} + П \quad (4.8)$$

И составит:

$$\begin{aligned} Ц &= C_{\text{осн.мат}} + C_{\text{всп.мат.}} + C_{\text{раб.обор.}} + Z_{\text{раб}} + Z_{\text{страх}} + P_{\text{нак}} + П = C + P_{\text{нак}} + П \\ &= 66013,7 + 180 + 11222,33 + 6601,37 = 150031,1 \text{ руб.} \end{aligned}$$

#### 4.1.2 Стоимость изготовления силиконовой формы

Количество материала, затраченного на изготовление силиконовой формы, рассчитывается по формуле (4.1). В нашем случае используется компаунд «Пентэласт 750», марки А(1/1), его цена составляет  $C_{\text{осн.мат.}} = 1648,31$  руб/кг. Необходимое количество силикона рассчитывается из учета габаритных размеров мастер модели, в данном случае составляет 2,1 кг.

$$C_{\text{осн.мат}} = 2,1 \times 1648,31 \times 1,05 = 1211,51 \text{ руб.}$$

Амортизация оборудования за час работы на вакуумной установке МТТ С5/04 и термошкафа рассчитывается по формуле (4.3), при  $C_{\text{ч}} = 150$  руб./ч и времени затраченным на вакуумирование и прогрев силиконовой формы равняется 1 час, следовательно:

$$C_{\text{раб.обор}} = \frac{60}{60} \times 150 = 150 \text{ руб.}$$

Заработная плата рассчитывается относительно времени, затраченного на изготовление силиконовой формы равное 90 минут и оплаты труда за час, в нашем случае рабочий получает 250 руб/час. Для изготовления 100 сопловых аппаратов нам потребуется 4 силиконовых формы, таким образом, получаем:

$$Z_{\text{раб}} = 100 \times \frac{90}{60} \times 4 = 600 \text{ руб}$$

По формуле (4.4) рассчитываем страховые выплаты:

$$Z_{\text{страх.}} = 0,3 \times Z_{\text{раб.}} = 0,3 \times 600 = 180 \text{ руб.}$$

Себестоимость силиконовой формы составляет:

$$C = C_{\text{осн.мат}} + C_{\text{раб.обор.}} + Z_{\text{раб.}} = 1211,51 + 150 + 1500 = 8019,05 \text{ руб.}$$

Накладные расходы вычисляем по формуле (5.6):

$$P_{\text{нак}} = 0,17 \times C = 0,17 \times 8019,05 = 1363,24 \text{ руб.}$$

По формуле (4.7) рассчитывается прибыль

$$П = 0,1 \times C = 801,9 \text{ руб.}$$

Следовательно, цена на изготовление силиконовой формы вычисляется по формуле (4.8) и составляет:

$$Ц = C + P_{\text{нак}} + П = 8019,05 + 1363,24 + 801,9 = 10184,2 \text{ руб.}$$

Аналогичным образом рассчитывается стоимость изготовления восковых моделей. По итогам всех расчетов была составлена сводная таблица 4.1.

Таблица 4.1 – Таблица расчета себестоимости изготовления

№	Наименование статьи расхода	Цена за единицу	Единицы измерения	Необходимое количество	Единицы измерения	k	Затраты, руб.
1	2	3	4	5	6	7	8
Печать прототипа детали							
1	Основной материал FullCure 720	18000	руб/кг	0,801	кг	1,05	15138,9
2	Вспомогательный материал FullCure 705	16000	руб/кг	0,808	кг	1,05	14784
3	Работа оборудования - 3D-принтер	500	руб/ч	14,5	час	-	7250
4	Заработная плата (ЗП) рабочего	300	руб/ч	2	час	-	600
5	Отчисления на социальное страхование (30 % от ЗП)	-	-	-	-	0,30	180
6	Итого себестоимость (С)	-	-	-	-	-	37772,9
7	Накладные расходы (17% от С)	-	-	-	-	0,17	6421,4
8	Прибыль (10% от С)	-	-	-	-	0,1	3777,3
9	Цена	-	-	-	-	-	85924,5

Продолжение таблицы 4.1

Изготовление силиконовой пресс-формы							
1	2	3	4	5	6	7	8
10	Основной материал – силикон «Пентэласт 750», марки А (1/1)	1648,312	руб/кг	2,1	кг	1,05	3634,5
11	Работа оборудования - МТТ С5/04; термошкаф	150	руб/ч	1	час	-	150,00
12	Заработная плата рабочего (подготовка короба и модели для формовки)	250	руб/ч	6	час	-	600
13	Отчисления на социальное страхование	-	-	-	-	0,30	180
14	Итого себестоимость	-	-	-	-	-	4384,5
	Накладные расходы	-	-	-	-	0,17	745,4
	Прибыль	-	-	-	-	0,1	438,5
2	Цена	-	-	-	-	-	5568,3
3	Количество моделей	2 шт					11136,7

Продолжение таблицы 4.1

Изготовление модели из модельной массы							
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Основной материал – воск F28-44В	3746,03	руб/кг	0,56	кг	-	2097,8
2	Вспомогательный материал	-	-	-	-	-	-
3	Работа оборудования - МТТ С5/04; термошкаф	150	руб/ч	1	час	-	150
4	Заработная плата рабочего	250	руб/ч	1	час	-	250
5	Отчисления на социальное страхование	-	-	-	-	0,30	75,00
6	Итого себестоимость	-	-	-	-	-	2572,8
7	Накладные расходы	-	-	-	-	0,17	437,4
8	Прибыль	-	-	-	-	0,05	257,3
9	Цена за 1 штуку:	-	-	-	-	-	3267,4
10	Количество моделей	100 шт				326740	

## 4.2 Экономический расчет изготовления восковых моделей с применением традиционной технологии изготовления

### 4.2.1 Стоимость изготовления металлической пресс-формы

Для изготовления сложнопрофильных, ответственных деталей двигателя, таких как сопловые аппараты турбины необходимо подобрать материал, из которого будет изготовлена пресс-форма. Чаще всего применяются следующие материалы: резина, высокопрочные полимеры, гипс, дерево, но в большинстве случаев применяют металл.

Материал для пресс-формы выбирают в зависимости от необходимого числа моделей и принятой технологии изготовления. В нашем случае для изготовления 100 восковых моделей будем использовать Ст 45.

По формуле 4.1 рассчитываем количество основного материала, нам потребуется стальной брусок весом примерно 40 кг, цена Ст 45  $C_{\text{осн.мат}} = 60$  руб/кг. Таким образом:

$$C_{\text{осн.мат}} = 40 \times 60 \times 1,05 = 2520 \text{ руб.}$$

Так как нам необходимо изготовить сложно профильную поверхность, то на изготовление пресс-формы в среднем уходит 2 месяца, для расчета амортизации оборудования по формуле (4.3) при  $C_{\text{ч}} = 120$  руб/час и времени, затраченного на обработку получаем:

$$C_{\text{раб.обор}} = 296 \times 120 = 35520 \text{ руб.}$$

Зарботная плата оператора станка с ЧПУ в среднем составляет 24000руб/мес. Таким образом, за 2 месяца оператор получит 48000 руб.

Рассчитываем страховые выплаты по формуле (4.4):

$$Z_{\text{страх.}} = 0,3 \times Z_{\text{раб.}} = 0,3 \times 48000 = 14400 \text{ руб.}$$

Себестоимость металлической пресс – формы составляет:

$$C = C_{\text{осн.мат}} + C_{\text{раб.обор.}} + Z_{\text{раб}} = 2520 + 35520 + 48000 = 86040 \text{ руб.}$$

Накладные расходы вычисляем по формуле (4.6):

$$P_{\text{нак}} = 0,17 \times C = 0,17 \times 86040 = 14626,8 \text{ руб.}$$

По формуле (4.7) рассчитывается прибыль, которая составляет:

$$П = 0,1 \times C = 8604 \text{ руб.}$$

Следовательно, цена на изготовление первого варианта металлической пресс – формы вычисляется по формуле (4.8) и составляет:

$$Ц_1 = C + P_{\text{нак}} + П = 86040 + 14626,8 + 8604 = 109270,8 \text{ руб.}$$

Для получения годных изделий приходится не раз дорабатывать форму или переделывать ее полностью. Для упрощения расчета предположим, что наша форма получилась со второго раза.

Стоимость изготовления восковых моделей рассчитывается аналогично расчёту, представленному в таблице 4.1. По итогам всех расчетов была составлена сводная таблица 4.2.



Таблица 4.2 - Таблица расчета себестоимости изготовления

	Наименование статьи расхода	Цена за единицу	Единицы измерения	Необходимое количество	Единицы измерения		Затраты, руб.	
Изготовление металлической пресс-формы								
1	2	3	4	5	6	7	8	
2	Основной материал – сталь 45	60	руб/кг	40	кг	1,05	2520	
3	Вспомогательный материал	-	-	-	-	-	-	
4	Работа оборудования	120	руб/ч	296	час	-	35520	
5	Заработная плата рабочего (подготовка короба и модели для формовки)	130,44	руб/ч	296	час	-	38610,24	
6	Отчисления на социальное страхование	-	-	-	-	0,30	11583,1	
7	Итого себестоимость	-	-	-	-	-	76650,2	
8	Накладные расходы	-	-	-	-	0,17	13030,5	
9	Прибыль	-	-	-	-	0,05	7665,02	
10	Цена	-	-	-	-	-	97345,8	
11	Количество моделей	2 шт						194691,6

Продолжение таблицы 4.2

Изготовление модели из модельной массы								
1	2	3	4	5	6		8	
12	Основной материал – воск F28-44В	3746,03	руб/кг	0,56	кг	-	2097,8	
13	Заработная плата рабочего	250	руб/ч	1	час	-	250	
14	Отчисления на социальное страхование	-	-	-	-	0,30	75,00	
15	Итого себестоимость	-	-	-	-	-	2422,8	
16	Накладные расходы	-	-	-	-	0,17	411,9	
17	Прибыль	-	-	-	-	0,05	242,3	
18	Цена за 1 штуку:	-	-	-	-	-	3076,9	
19	Количество моделей	100 шт						307690

### 4.3 Сравнительный анализ расчетов

Сравним полученные результаты экономических расчетов двух разных методов получения восковых моделей, полученные результаты представлены на рисунке 4.1.

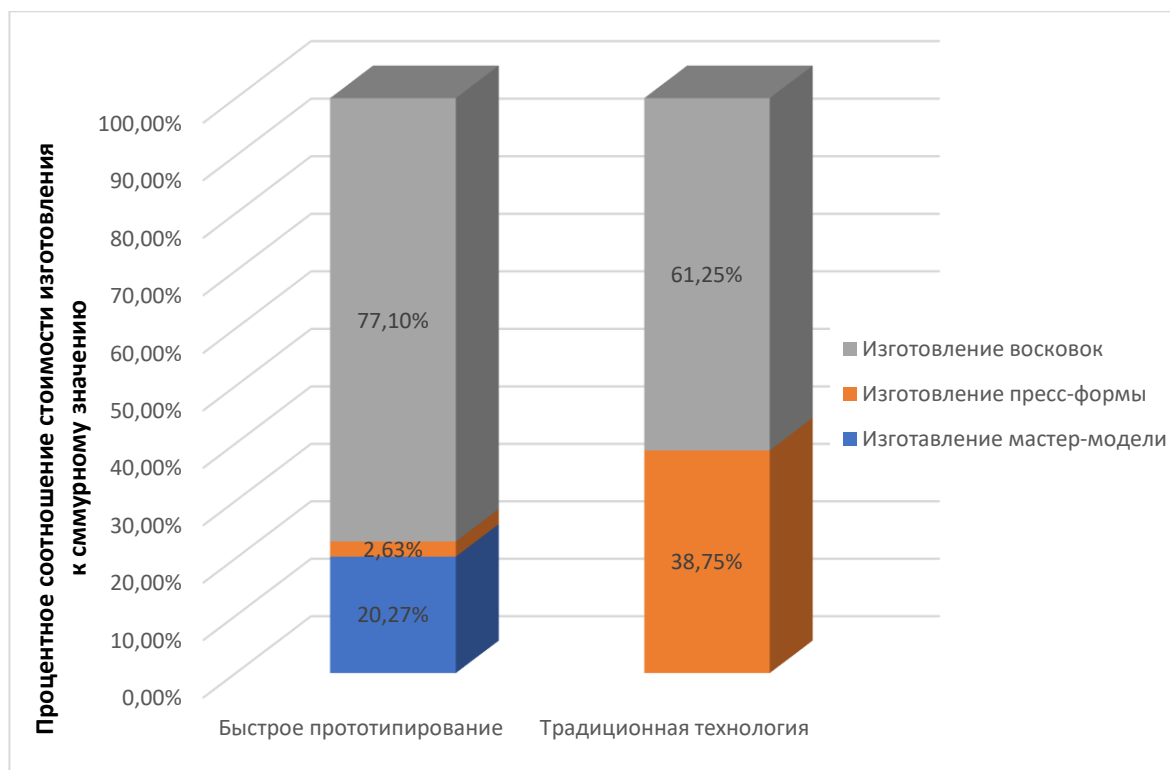


Рисунок 4.1 – Диаграмма результатов экономического расчета в процентном соотношении

При применении технологии быстрого прототипирования затраты на изготовление силиконовой пресс-формы в 2 раза меньше несмотря на то, что для ускорения процесса изготовления восковок применяем 2-е силиконовые пресс-формы. Для большей наглядности на рисунке 4.2 представлены результаты в цифрах.

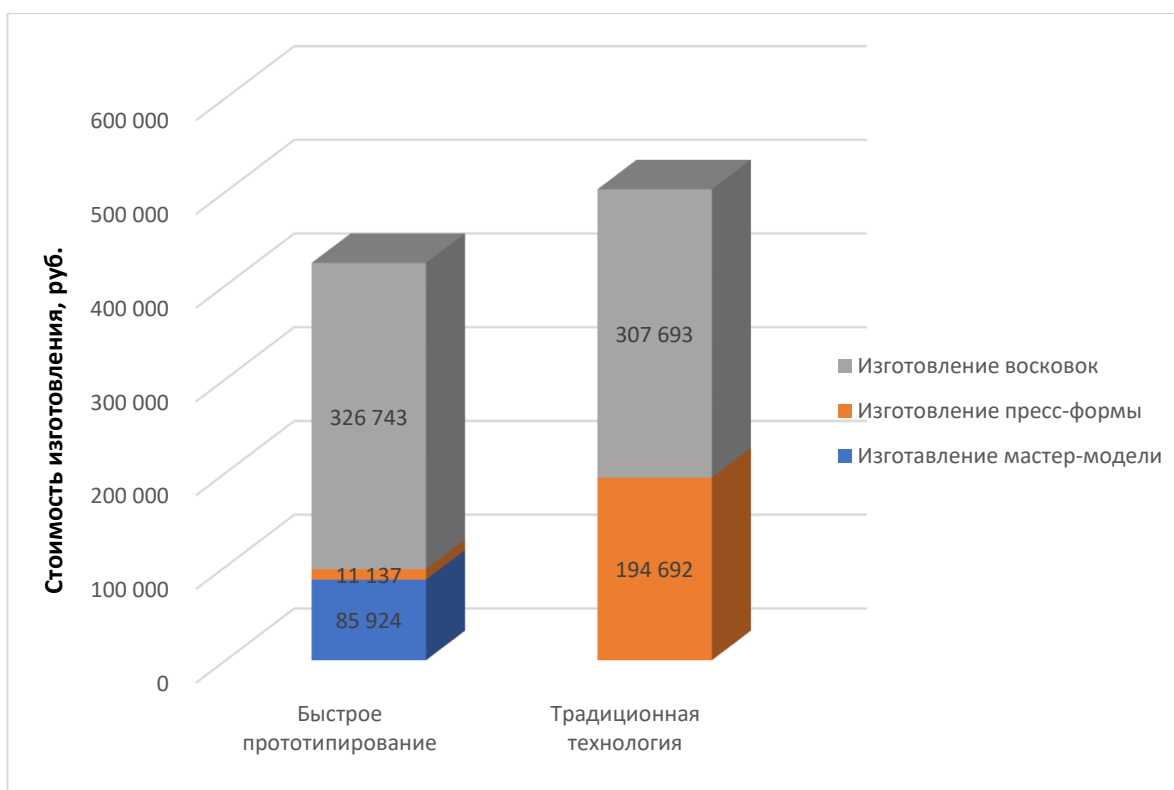


Рисунок 4.2 – Диаграмма результатов экономического расчета

В таблице 4.3 представлены основные результаты расчёта экономической эффективности применения технологии быстрого прототипирования.

Таблица 4.3 – Результаты экономического расчета

Наименование	Изготовления восковых моделей в условиях реализации аддитивных технологий	Изготовления восковых моделей с применением традиционной технологии изготовления
Печать прототипа	7807,27	-
Изготовление формы	13964,2	58011
Изготовление восковых моделей	239532,5	237950
Итого	265029,98	295961

Так в расчетах мы опирались на изготовление партий для опытного производства при отработке конструкции и технологического процесса, так же необходимо провести дополнительный сравнительный расчет на эффективность использования технологии быстрого прототипирования в

условиях производства и больших партий. Результаты расчета показаны на рисунке 4.3.

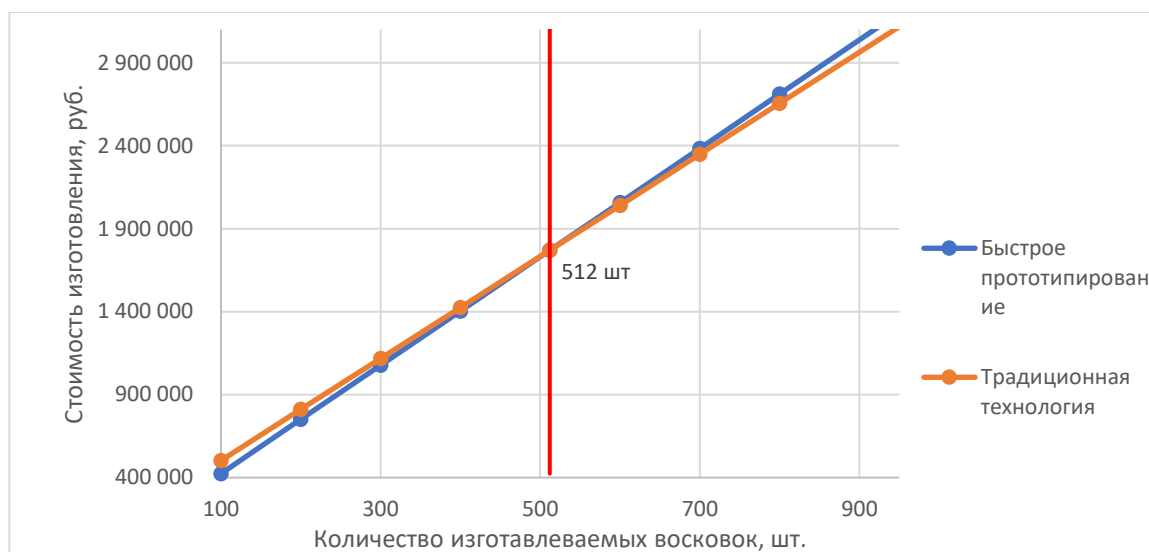


Рисунок 4.3 — Диаграмма сравнения эффективности использования технологии быстрого прототипирования относительно традиционной технологии с ростом количества изготавливаемых восковок

По диаграмме видно, что изготовление восковок при помощи технологии быстрого прототипирования выгодно только в условиях опытного производства, так как при изготовлении восковок в количестве от 512 шт. более эффективным методом является традиционный технологический процесс.

#### 4.4 Выводы по главе

Проводя анализ экономической эффективности, можно сделать вывод, что применение аддитивных технологий позволяет сократить расходы на производство в 2 раза по сравнению с традиционным методом изготовления восковых моделей.

Так же по результатам расчета экономической эффективности применения технологии быстрого прототипирования в условиях производства, то есть при изготовлении большего числа отливок, видно, что применение аддитивных технологий целесообразно только при опытном производстве при изготовлении партий до 512 шт.

В связи с этим можно утверждать, что данный технологический процесс выгоднее традиционного, но в условиях опытного производства на этапе отработки конструкции и технологического процесса изготовления сопловых аппаратов турбины ГТД.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы был произведен анализ современного состояния технологического процесса изготовления деталей газотурбинного двигателя, а именно технологии литья соплового аппарата турбины первой ступени. По результатам которого, были поставлены задачи по снижению влияния недостатков данной технологии на технологический процесс изготовления детали «Сопловой аппарат», а именно высокому проценту брака отливок и серьёзных экономических затрат на изготовления отливок при опытном производстве.

В первую очередь была произведена симуляция технологического процесса литья по выплавляемым моделям рассматриваемой детали в программном комплексе ProCast. По результатам симуляции были сформулированы рекомендации по модернизации ЛПС. После симуляции модернизированного технологического процесса можно сделать вывод о снижении процента брака отливок, благодаря повышению эффективности литниково-питающей системы, снижению пористости и ряда других параметров.

Так же был разработан модернизированный технологический процесс изготовления отливок, суть которого является в замене этапа изготовления металлических пресс-форм на изготовления силиконовых с помощью метода быстрого прототипирования.

Результаты сравнения эффективности использования технологии быстрого прототипирования относительно традиционной технологии показали, что для опытного производства отливок детали «Сопловой аппарат» более выгоден с экономической точки зрения применение метода быстрого прототипирования.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Елисеев, Ю.С. Технология производства авиационных газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. пособие для вузов / Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, [и др.]. М.: Машиностроение, 2003. – 512 с.
- 2 Сулима, А.М., Основы технологии производства газотурбинных двигателей [Текст] / А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1996. – 480 с.
- 3 Смелов, В.Г. Разработка методики литья из жаропрочных сплавов сложных деталей малоразмерных газотурбинных двигателей с применением аддитивных технологий [Текст] / В. Г. Смелов, А. В. Балякин, А. В. Агаповичев, Р. А. Вдовин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, 2014. - №5(47), часть 3.
- 4 Демин, Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Электронный ресурс] : учебник / Ф.И. Демин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев. – 2-е изд. – Самара: Изд-во СГАУ, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).
- 5 Крымов, В.В., Производство газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Крымов, Ю.С. Елисеев, К.И. Зудин. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.
- 6 Химушин, Ф.Ф. Жаропрочные стали и сплавы [Текст] / Ф.Ф. Химушин. – М.: Металлургия, 1969, – 752 с.
- 7 Harada, H. Alloy design for nickel-base superalloys [text] / H. Harada, M. Yamazaki, Y. Koizumi [et al] // High Temperature Alloys for Gas Turbines and Other Application. – 1982. – P. 721-735.
- 8 Yukawa, N. Alloys design for superalloys by the deelectron concept [text] / N. Yukawa, M. Morinaga, H. Ezaki [et al] / High Temperature Alloys for Gas Turbines and Other Application. – 1986. – P. 935-944.
- 9 Симс, Ч., Жаропрочные сплавы [Текст] / Ч. Симс, В. Хагель, Е.М. Савицкого. – М.: Металлургия, – 1976. – 568 с.



10 История жаропрочных сплавов. Статья [Электронный ресурс] - [http://viam.ru/history\\_gs](http://viam.ru/history_gs), (дата обращения 14.02.2020)

11 Каблов, Е.Н. ВИАМ Производство турбинных лопаток ГТД методом направленной кристаллизацией [Текст] / Е.Н. Каблов // Газотурбинные технологии. – 2000. – №3.

12 Фомина, В.И. Статистический анализ качества изготовления турбинных лопаток [Текст] / А.В. Томашевский, В.И. Фомичева // Авиационно-космическая техника и технология. - 2013. - №7(94).

13 Вагнер, Е. Т. Лазерные и оптические методы контроля в самолетостроении [Текст] / Е. Т. Вагнер, А. А. Митрофанов, В. Н. Барков. – М.: Машиностроение, 1977. – 176 с.

14 Гришанов, В.Н. Современные лазерные измерительные системы в производственном цикле космической техники [Текст] / В.Н. Гришанов, А.А. Ойнонен // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета, – 2012, – №1(32).

15 Ткачев, К. Н. Лазерная координатно-измерительная система FARO Laser Tracker [Текст] / К. Н. Ткачев // Контроль. Диагностика. – 2006. - №12. – С. 59 – 61.

16 Галиулин, Р.М. Лазерный высокопроизводительный контроль трехмерной геометрии изделий сложной формы [Электронный ресурс] / Р.М. Галиулин, Д.Р. Богданов, Р.Р. – [http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:hLcw5LIO264J:scholar.google.com/&hl=ru&as\\_sdt=0,5](http://scholar.googleusercontent.com/scholar?q=cache:hLcw5LIO264J:scholar.google.com/&hl=ru&as_sdt=0,5), (дата обращения 14.04.2017).

17 Галиулин, Р.М. Компьютерные лазерно-оптоэлектронные системы измерений геометрии изделий сложной формы "ОПТЭЛ" [Текст] / Р.М. Галиулин Р.М. // Авиационная техника. Известия вузов. – 1997, – №1, – С.100-106.

18 Galiulin, R.M. Optoelectronic computer-aided systems for inspection of GTE complex objects [text] / R.M. Galiulin [and others] // 7-th International

Symposium on Laser Metrology applied to Science, Industry and Everyday Life. – 2002, – P. 178-184.

19 Тарасевич, Н.И. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов [Текст] / И. В. Корниец, И. Н. Тарасевич, А. В. Дудченко // Металл и литье Украины. – 2010. – №5.

20 Михаил, А. Моделирование литейных процессов: что и как выбрать [Текст] / М. Агеев, А. Рылов, В.Турищев // Литейщик России. – 2010. – №5.

21 Турищев, В.В. Моделирование литейных процессов: что выбрать [Текст] / В.В. Турищев // Машиностроение. CAD master. – 2015. – №2.

22 Монастырский, А. СКМ ЛП «ПолигонСофт» 13.Х. обзор, итоги, планы [Текст] / А. Монастырский, М. Тихомиров // CAD master. – 2013. – №2.

23 Щетинин, А.В. Моделирование литейных процессов на основе средств обеспечения вычислительных экспериментов диссертация [Текст] / дисс. канд. техн. наук: 05.13.18: защищена 2006 г. / Щетинин Алексей Викторович. – Воронеж, 2006. – 138 с.

24 Норенков, И.П. Введение в автоматизированное проектирование технических устройств и систем [Текст] / И.П. Норенков – М.: Машиностроение, 1986. – 304 с.

25 Жеглов, С.В. Разработка математического и информационного обеспечения комплекса автоматизированного проектирования технологии изготовления корпусных отливок [Текст] / дисс. канд. техн. наук: 05.13.12: защищена 2005г. / Жеглов Сергей Валерьевич. – Воронеж, 2005. – 119 с.

26 Пчелинцев, С.Н. Проектирование припусков и прибылей для стальных отливок. [Текст] / С.Н. Пчелинцев //Литейное производство. – 1985, – №11. – С.17-19.

27 Дубровская, А.С. Численное моделирование процесса изготовления отливок деталей газотурбинный двигателей методом точного

литья [Текст]: дисс. канд. техн. наук: 05.13.18: защищена 22.09.15 / Дубровская Александра Сергеевна. – Пермь, 2015. – 152 с.

28 Завалишин, И.В. Особенности технологической подготовки производства деталей турбины газотурбинного двигателя [Текст] / И.В. Завалишин, А.Г. Финогеев // Труды МАИ. – Выпуск №56.

29 Добрышкина, Е.М. Исследование применения технологий быстрого прототипирования для изготовления лопаток турбины ГТД [Текст] / А.В. Балякин, Е.М. Добрышкина, Р.А. Вдовин, В.П. Алексеев // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 4(6). – С. 1168-1172.

30 Razvan, U Optimization of Additive Manufacturing Processes Focused on 3D Printing, Rapid Prototyping Technology [text] / U. Razvan, Dr. M. Noque, A. Nedelcu // Principles and Functional Requirements. –2011. – P.7-16.

31 Сафин, Д.Ю. Технологии 3D-прототипирования и макетирования [Текст] / Д.Ю. Сафин // Будущее машиностроения России. – 2011.

32 Зленко, М.А. Аддитивные технологии в машиностроении [Текст] / М.А. Зленко, М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // Пособие для инженеров. – М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ». – 2015. – С.220.

33 Сыщиков, Д.Н. Анализ номенклатуры деталей типа «лопатка турбины» газотурбинного двигателя и технологических процессов их изготовления [Текст] / Д.Н. Сыщиков // Вестник РГАТУ. – 2017. – №2(41), 320-325 с.

34 Осинцев, О.Е. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки. Справочник [Текст] / О.Е. Осинцев, В.Н. Федоров – М.: Машиностроение, 2004. – 336 с.

35 Черников, Д.Г. Моделирование литья деталей аэрокосмического назначения в ProCAST [Электронный ресурс] / Д.Г. Черников, В.Г. Смелов, Р.А. Вдовин, А.Г. Шляпугин // Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. текстовые и граф. дан. (16,7 Мбайт). – Самара, 2012. – 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

- 36 Абдуллин, А.Д. Компьютерное моделирование литейных процессов с использованием программного комплекса ProCAST [Текст] / А.Д. Абдуллин // Автоматизация проектирования. – 2010. – №6. – С.46-47.
- 37 Девятов, С. Виртуальное моделирование литейных технологий [Текст] / С. Девятов // CAD master. – 2016. – №5. С. 36-43.
- 38 Смелов, В.Г. Использование систем численного моделирования для исследования технологического процесса литья лопаток в заготовительном производстве [Текст] / В.Г. Смелов, Р.А. Вдовин, А.В. Агаповичев // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2015. – Том 14, – №3. – Ч.2. – С. 391-399.
- 39 Smelov, V.G., Analysis of results of computer simulation of the casting process [text] / V.G. Smelov, R.A. Vdovin, S.P. Golanov // Applied Mechanics and Materials. – 2015. – V. 770. – P. 223-228.
- 40 Abdullin, A. D. End-to-end simulation of casting and metal-forming operations with ProCast and Qform software [text] / A.D. Abdullin, A.A. Ershov // Metallurgist. –2014, –Vol. 58. – P.339-345.
- 41 Дубровская, А.С. Численный анализ эволюции напряженно-деформированного состояния кристаллизующихся лопаток турбины [Текст] / А.С. Дубровская, К.А. Донгаузер // Вестник ПНИПУ, Механика. – 2012. - №1. – С. 16-30.
- 42 Николаева, Н.В. Методика литья деталей аэрокосмического назначения с использованием виртуального моделирования в современном САЕ-программном комплексе ProCAST [Текст] / Н.В. Николаева, А.В. Рогожкин, В.Г. Смелов, Р.А. Вдовин // XIII Королёвские чтения, – 2015. – С. 226-227.
- 43 Горлач, Б.А. Математика [Текст] : учебник пособие для студентов вузов обучающимся по экономическим специальностям / Б.А. Горлач. – М.:ЮНИТИ-ДАНА, – 2016. – 911с.

44 Карпилова, О.М. Теория вероятности и математическая статистика [Текст] : метод. указания к курсовой работе /О.М. Карпилова, О.П. Шевченко. - Самара: СГАУ, 2004. – 56 с.

45 Демин, Ф.И. Фундаментальные основы обеспечения геометрической точности при производстве двигателей авиационной и ракетной техники [Текст]/ Ф.И. Демин. – М.: Машиностроение, 2015. – 244 с.

46 Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]/ В.Е. Гмурман. – М.: Высшая школа, 1977. –

47 Пузыня, К.Ф., Экономическая эффективность научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок в машиностроении [Текст] / К.Ф. Пузыня, А.С. Запаснюк. – Л.: Машиностроение. Ленинград. отд-ние, 1978. –304 с.

48 Николаева, Н.В. Проектирование рабочего колеса турбины МГТД и технологического процесса его изготовления на основе сквозного использования компьютерных технологий [Текст]: выпускная квалификационная работа магистра: 160700.68: защищена 20.06.15 / Николаева Наталья Владимировна. – М., 2015. – 161 с.

49 В помощь бухгалтеру. Данные. [Электронный ресурс] – [http://mvf.klerk.ru/spr/spr39\\_9.htm](http://mvf.klerk.ru/spr/spr39_9.htm), (дата обращения 01.01.2017)

50 Чумаков, В.А. Технология литья лопаток газотурбинных двигателей по методу направленной кристаллизации / В.А. Чумаков, В.М. Степанов, В.Г. Иванов // Литейное производство. – 1978. – № 1. – С. 23–24.

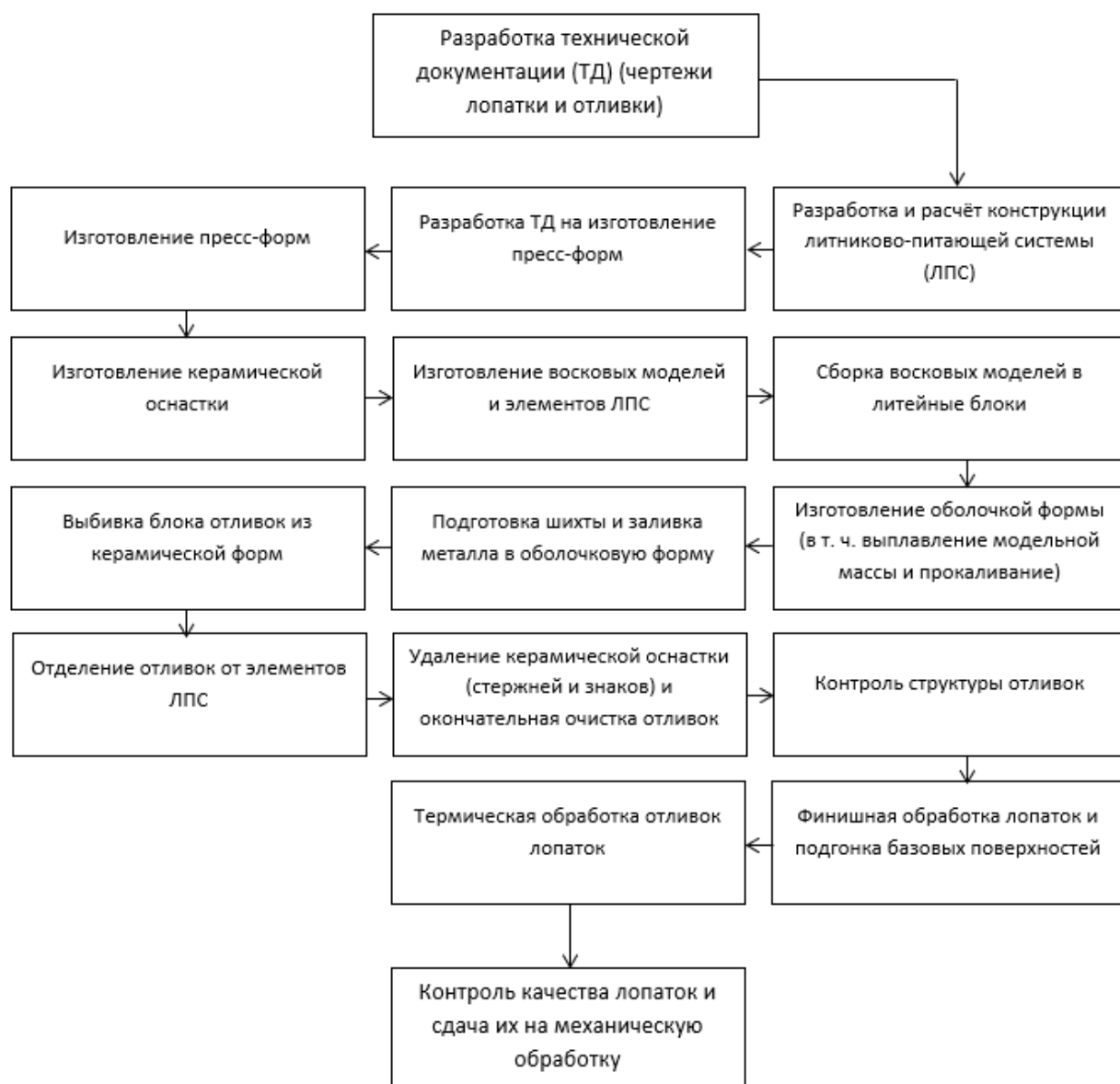
51 Шитарев, И.Л. Отливка лопаток турбины методом направленной кристаллизации на полуавтомате ПМП–2 / И.Л. Шитарев, Б.Г. Иванов // Новые технологические процессы и надежность ГТД. – 1982. – № 2 (34). – С. 36–38.

52 Шитарев, И.Л. Разработка научно-технических основ высокоэффективных технологических процессов в производстве газотурбинных двигателей: дис. ... доктора техн. наук: 05.07.05 / Шитарев Игорь Леонидович. – Самара, 1993. – 59 с.

- 53 Шкленник, Я.И. Литье по выплавляемым моделям / Я.И. Шкленник, В.А. Озеров. – М.: Машиностроение, 1984. – 408 с.
- 54 Трушин, С.И. Метод конечных элементов. Теория и задачи / С.И. Трушин. – М.: Ассоциации строительных вузов, 2008. – 256 с.
- 55 Скубачевский, Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Г.С. Скубачевский. – М.: Машиностроение, 1969. – 544 с.
- 56 Полетаев, В.А. Технология автоматизированного производства лопаток газотурбинных двигателей / В.А. Полетаев. – М.: Машиностроение, 2006. – 256 с.
- 57 Павлинич, С.П. Температурное поле системы «форма–стержень–лопатка ГТД» при литье / С.П. Павлинич, А.С. Челушкин, Д.Ю. Письмеров // Литейщик России. – 2008. – № 3. – С. 36–38.
- 58 Колтыгин, А.В. Использование компьютерного моделирования при разработке литниковых систем для изготовления отливок типа «лопатка» из сплава на основе титана / А.В. Колтыгин, С.П. Павлинич, В.Д. Белов [и др.] // Литейщик России. – 2011. – № 12. – С. 22–24
- 59 Колтыгин, А.В. Об особенностях расчета усадочных дефектов в отливках с использованием программного пакета ProCast / А.В. Колтыгин, В.Е. Баженов // Литейное производство. – 2009. – № 5. – С. 36–38.
- 60 Каблов Е.Н. Литые лопатки газотурбинных двигателей / Е.Н. Каблов. – М.: МИСиС, 2001. – 632 с.
- 61 Севастьянов, Г.М. Моделирование напряженно-деформированного состояния при заливке и затвердевании металла в керамической оболочковой форме: дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.04 / Севастьянов Георгий Мамиевич. – Владивосток, 2011. – 101 с.
- 62 Тарасевич, Н.И. Сравнительный анализ систем компьютерного моделирования металлургических и литейных процессов / Н.И. Тарасевич, И.В. Корниец, И.Н. Тарасевич [и др.] // Металл и литье Украины. – 2010. – № 5. – С. 20–25.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Блок-схема базового технологического процесса изготовления отливок детали «Сопловой аппарат»



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица 1 – Классификация аддитивных технологий согласно стандарту ASTM F2792

Группа	Технологий	Исходный материал	Источник энергии	Особенности
Material Extrusion	Fused Deposition Modeling (FDM)	Термопластики, керамические суспензии, металлические пасты	Термическая энергия	Невысокая стоимость установок; использование нескольких материалов; ограниченная точность; невысокое качество поверхности
	Contour Crafting			
Material Jetting	Polyjet/Inkjet Printing	Фотополимеры, воск	Термическая энергия/фотоотверждение	Печать из различных материалов; высокое качество поверхности
Binder Jetting	Indirect Inkjet Printing (Binder 3DP)	Полимерные порошки, керамические порошки, металлические порошки	Термическая энергия	Необходимость пропитки изделий после их построения; широкий выбор материалов; высокая пористость изделий
Sheet Lamination	Laminated Object Manufacturing (LOM)	Металлические листы, полимерные пленки, керамические ленты	Лазерный луч	Высокое качество поверхности; необходимость удаления остатков материала
Vat Photopolymerization	Stereolithography (SLA)	Фотополимеры, керамики (оксиды Al, Zr, пьезокерамики)	Ультрафиолетовый лазер	Высокая скорость построения; высокая точность изготовления; высокая стоимость исходных материалов
Powder Bed Fusion	Selective Laser Sintering (SLS)	Металлические и керамические порошки	Лазерный луч	Высокая точность изготовления; высокая плотность изделий; необходимость использования поддержек
	Direct Metal Laser Sintering (DMLS)			
	Selective Laser Melting (SLM)			
	Electron Beam Melting (EBM)		Электронный луч	
Directed Energy Deposition	Laser Engineered Net Shaping (LENS) Electron Beam Welding (EBW)	Металлические порошки и проволоки	Лазерный луч, электронный луч	Возможность ремонта изделий; создание функционально-градиентных изделий; низкое качество поверхности



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

Блок-схема модернизированного технологического процесса изготовления отливок детали «Сопловой аппарат»

