

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ  
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени академика С.П. КОРОЛЕВА  
(национальный исследовательский университет)» (СГАУ)

**РАЗРАБОТКА ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АДДИТИВНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЙ**

Электронное учебное пособие

Работа выполнена по мероприятию блока 2 «Развитие и повышение  
эффективности научно-инновационной деятельности» и  
блока 3 «Развитие информационной научно-образовательной среды и инфраструктуры»  
Программы развития СГАУ на 2009 – 2018 годы  
по проекту «Разработка технологии создания виртуального ГТД и проектирование на ее  
основе микрогазотурбинного двигателя»  
Соглашение № 2/12 от 03.06.2013 г.

УДК 621.74 (075)+621.431.75(075)

ББК 34.6я7+39.55я7

P177

Авторы: **Хаймович Александр Исаакович,**

**Смелов Виталий Геннадиевич,**

**Балякин Андрей Владимирович,**

**Вдовин Роман Александрович,**

**Кокарева Виктория Валерьевна**

Рецензент: Скуратов Д. Л., д-р техн. наук, профессор

Компьютерная верстка Н.В. Николаева

**Разработка инновационных технологических процессов на основе использования аддитивных технологий** [Электронный ресурс]: электрон. учеб. пособие / А.И. Хаймович, В.Г. Смелов, А.В. Балякин, Р.А. Вдовин, В.В. Кокарева; М-во образования и науки РФ, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). – Электрон. и граф. дан. (19,5 Мбайт). - Самара, 2013. -1 эл. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены основные технологии быстрого прототипирования, предложена технология изготовления деталей ГТД с помощью аддитивного производства.

Электронное учебное пособие предназначено для студентов факультета «Двигатели летательных аппаратов» для бакалавров специальности 151900.62, изучающих дисциплины «Оборудование машиностроительных производств» в 6 семестре и «Разработка оптимальных технологических процессов с использованием CAE/CAD/CAM/PDM-систем» в 8 семестре, для магистров специальности 160700.68, изучающих дисциплины «Инновационные технологии производства авиационных ДВС», «Инновационные производственные технологии в двигателестроении» в 9 и А семестре.

Подготовлено на кафедре ПДЛА.

© Самарский государственный  
аэрокосмический университет, 2013

## РЕФЕРАТ

Страниц 72, Рисунков 30, Таблиц 4, Библиографический список 3.

В учебном пособии рассмотрены вопросы проектирования отливок деталей ГТД с помощью технологий быстрого прототипирования. Дано описание технологических процессов изготовления детали типа «Крыльчатка».

Рассмотрены вопросы выбора типа, геометрии и параметров литниково-питающих систем, способ формирования силиконовых форм и получения восковых моделей, основные принципы литья в гипсовые формы.

## СОДЕРЖАНИЕ

1 Основные направления технологий быстрого прототипирования .....	7
2 Технология производства деталей с помощью аддитивных технологий.....	15
2.1 Расчет и проектирование ЛПС .....	19
2.2 Расчет прибылей отливок.....	34
2.3 Конструирование литниковой системы.....	44
2.4 Изготовление прототипа .....	62
2.5 Изготовление силиконовой формы и восковой модели.....	65
2.6 Изготовление отливки .....	69
Список использованных источников.....	72

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития машиностроения передовыми являются технологии быстрого прототипирования, которые позволяют в кратчайшие сроки получить прототип или экспериментальный образец изделия или детали.

При разработке литейной технологии очень важно выбрать наиболее рациональный способ получения отливки, обеспечивающий необходимые эксплуатационные свойства литых деталей и высокие технико-экономические показатели производства: получение качественных отливок при минимальной их стоимости; высокая производительность; максимальное использование имеющегося оборудования. При литье по выплавляемым моделям получаем мелкие и средние отливки, любой сложности с повышенной точностью и чистой поверхностью в основном из стали и труднообрабатываемых сплавов при серийном и массовом производстве.

Технологии быстрого прототипирования (аддитивные технологии) – современное средство производства функциональных изделий сложной геометрической формы. Преимущество данного метода состоит в возможности формировать объекты любой геометрической сложности, минуя стадию окончательной сборки и не производя значительные настройки специального оборудования. Технология быстрого создания прототипов включает следующие методы: стереолитография (SLA), лазерное спекание порошков (SLS), нанесение термопластов (FDM), 3-х мерная печать (3DP), и моделирование при помощи склейки (LOM) и многие другие. Каждая из вышеуказанных технологий быстрого создания прототипов имеет свои преимущества, недостатки и особенности. Выбор методики изготовления прототипа зависит от цели его изготовления. Например, для проведения тестовой сборки механизма, изготовить прототип достаточно просто. Однако если перед изготовителем стоит более широкая и трудоемкая задача,

например, требуется оценка внешнего вида изделия или его последующее использование в качестве модели для изготовления силиконовой оснастки, то необходима такая операция как финишная доводка прототипа. Эта операция осуществляется путем дополнительной ручной механической обработки, включающей в себя полировку и нанесение дополнительного аэрозольного покрытия. Результатом финишной доводки прототипа является устранение с видовых поверхностей следов послойного построения и придание поверхности готового изделия необходимой текстуры. При создании мастер-модели следует помнить, что любой дефект на ее видовой поверхности может отразиться и на уже готовой детали.

## **1 Основные направления технологий быстрого прототипирования**

Существуют следующие основные технологии быстрого прототипирования:

- стереолитография (STL – stereolithography);
- отверждение на твёрдом основании (SGC – Solid Ground Curing);
- нанесение термопластов (FDM – Fused Deposition Modeling);
- 3D-печать (технология PolyJet фирмы Objet Geometries);
- распыление термопластов (BPM – Ballistic Particle Manufacturing);
- лазерное спекание порошков (SLS – Selective Laser Sintering);
- моделирование при помощи склейки (LOM – Laminated Object Modeling);
- технология многосопельного моделирования (MJM – Multi Jet Modeling).

Прототипирование изделий перечисленными способами отличается исходным материалом и технологией нанесения слоев.

### ***Стереолитография - SLA***

Самым распространенным способом изготовления прототипа заданного изделия является стереолитография (SLA – StereoLithography Apparatus – стереолитографическое оборудование) (рисунок 1). Этот метод был разработан первым и на сегодняшний день является наиболее распространенным способом быстрого прототипирования. Метод необычайно популярен, чему способствует достаточно низкая стоимость готового прототипа. Стереолитография основана на послойном нанесении и

затвердевании жидкого фотополимера, который является основой полученной модели.

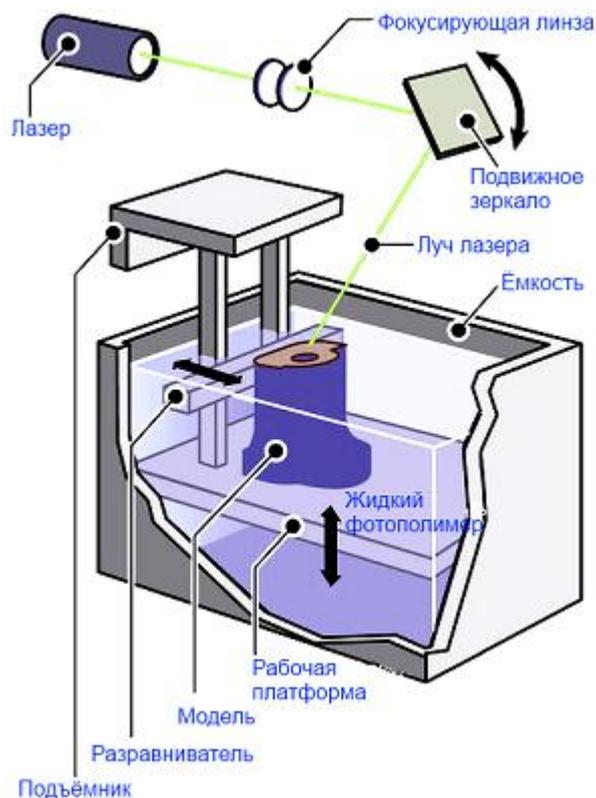


Рисунок 1 – Принцип действия стереолитографии

Основой стереолитографии является локальное изменение фазового состояния однородной среды (переход «жидкость – твердое тело») в результате фотоинициированной в заданном объеме полимеризации. Суть фотоинициированной полимеризации состоит в создании с помощью фотоинициирующего, например, лазерного излучения в жидкой реакционно-способной среде активных центров (радикалов, ионов, активированных комплексов), которые взаимодействуя с молекулами мономера инициируют рост полимерных цепей. Следствием этого является изменение фазового состояния среды, т.е. в облученной области образуется твердый полимер. Поскольку активные центры появляются только в облученной области, то и полимеризация протекает преимущественно в ней, т.е. достигается пространственная селективность фотоинициированной полимеризации.

Активные центры образуются при взаимодействии ФПК (фотополимеризующая композиция) с излучением из определенного спектрального диапазона. Эта спектральная селективность позволяет, в частности, проводить полимеризацию в условиях естественного освещения.

Используя разные способы облучения можно получить на поверхности ФПК полимерную пленку (плоскость), трек (линию) или керн (точку). Эти элементы можно использовать для формирования физических копий трехмерных объектов по их компьютерным моделям. Платформа, на которой «выращивается» деталь, устанавливается ниже поверхности ФПК на расстоянии равном толщине первого слоя. На поверхности ФПК формируется изображение, соответствующее первому сечению объекта. В облучаемой области образуется пленка твердого полимера.

Готовое изделие обладает достаточной твердостью, жесткостью, устойчивостью к воздействию механических нагрузок. Полимерная основа прекрасно клеится, легко окрашивается в различные цвета, поддается несложной механической обработке, обеспечивает хорошие визуальные параметры поверхности. Основным недостатком данного метода является высокая хрупкость полученных моделей.

### ***Лазерное спекание порошков – SLS***

Как следует из названия, в качестве рабочего органа применяется лазерный луч, последовательно спекающий порошковый материал по контуру каждого слоя. Порошковой основой могут выступать полимеры, керамика или металлический порошок. Тонкий слой порошкового сырья укладывается на рабочую поверхность, а затем луч лазера спекает его в нужных местах. Так происходит формирование твердого макета, соответствующего 3D-модели. Быстрое прототипирование металлических моделей, на сегодняшний день, возможно только этим методом (рисунок 2).

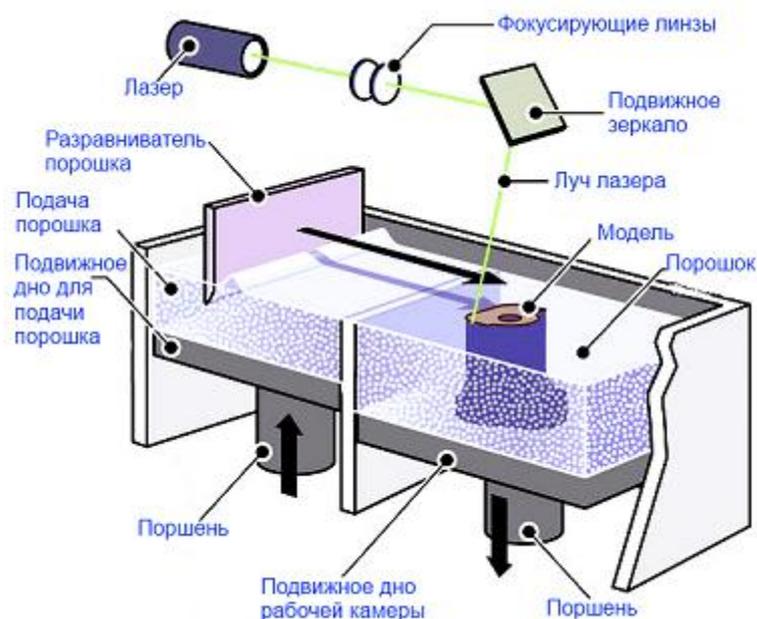


Рисунок 2 - SLS технология

В SLS печати используются материалы, близкие по своим свойствам к конструкционным маркам: металл, керамика, порошковый пластик. Порошковые материалы наносятся на поверхность рабочего стола и запекаются лазерным лучом в твёрдый слой, соответствующий сечению 3D модели и определяющий её геометрию. Оборудование для SLS-печати изготавливают следующие заводы: 3D Systems, F&S Stereolithographietechnik GmbH, The ExOne Company / Prometal, EOS GmbH.

### ***Технология нанесения термопластов – FDM***

Быстрое прототипирование, выполняемое по технологии FDM (Fused Deposition Modeling), происходит за счет послойного наложения на контур создаваемого изделия восковой или поликарбонатной нити (рисунок 3).

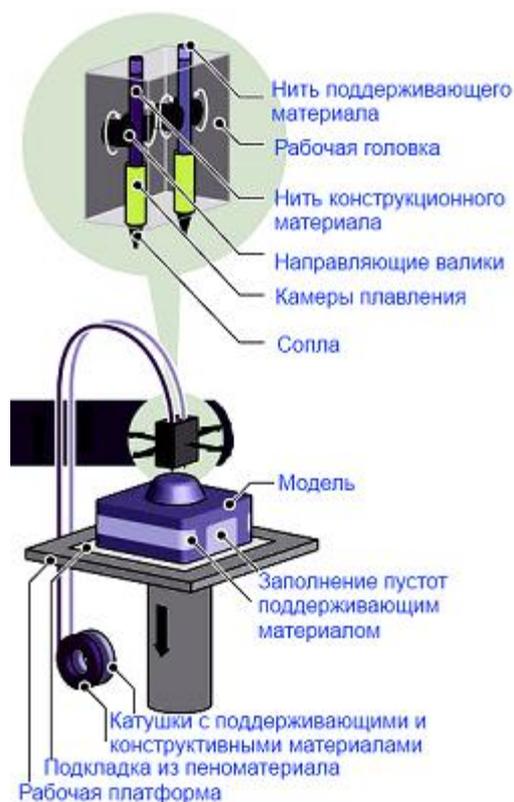


Рисунок 3 – Принцип действия селективного лазерного спекания порошков

Технология FDM печати заключается в следующем: выдавливающая головка с контролируемой температурой разогревает до полужидкого состояния нити из ABS пластика, воска или поликарбоната, и с высокой точностью подаёт полученный термопластичный моделирующий материал тонкими слоями на рабочую поверхность 3D принтера. Слои наносятся друг на друга, соединяются между собой и отвердевают, постепенно формируя готовое изделие.

Технология FDM применяется для изготовления единичных образцов продукции. В настоящее время 3D принтеры с технологией FDM печати изготавливаются компанией Stratasys Inc.

## *Технология PolyJet*

PolyJet - послойное распыление фотополимера с последующей полимеризацией каждого слоя с помощью освещения ультрафиолетовой лампой.

Печатающий блок 3D-принтера одновременно, тонкими слоями в 16 или 30 мкм, распыляет материал модели и поддержки, согласно данным математической модели. Каждый слой полимеризуется светом ультрафиолетовой лампы сразу же после нанесения. В итоге получается модель, не требующая какой-либо дополнительной обработки поверхности. Модель, отпечатанную по технологии PolyJet, можно использовать сразу же после завершения процесса печати (рисунок 4).

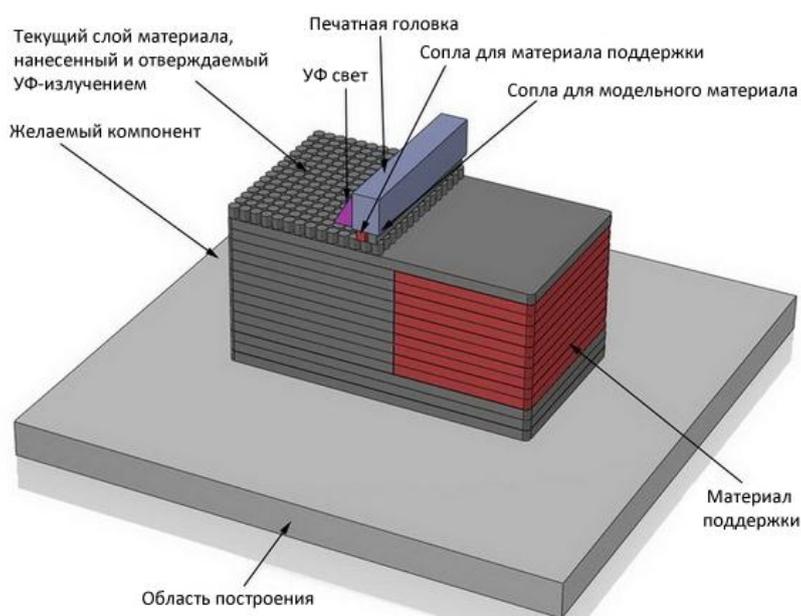


Рисунок 4 –PolyJet

В процессе 3D-печати образуются «висящие» и «нависающие» элементы. Для предотвращения их обрушения, все пустоты под такими элементами заполняются специальным материалом поддержки. Например, для 3D принтера Eden350V таким материалом является FullCure 705 Support – универсальный материал поддержки модели, используемый со всеми

модельными материалами, прозрачный, легко удаляется водой в станции промывки.

Детали, выращенные по технологии PolyJet, обладают различными свойствами в зависимости от используемого материала. Материалы различаются между собой по механическим, термическим, электрическим и химическим характеристикам. Например, полупрозрачный материал FullCure 720 может применяться для выращивания прототипов, в которых присутствуют внутренние объёмы или требуется прозрачность. 3D-печать способна передавать не только внешние поверхности, но и показывать внутренние объёмы. Однотонный материал Durus, аналогичный полипропилену, может применяться для создания элементов типа защелок, которые будут использоваться многократно. Гибкий материал Tango позволяет печатать прототипы гибких изделий.

Преимуществами технологии PolyJet являются:

- *Высокое качество:* Высочайшее разрешение с толщиной слоя 16 мкм позволяет получать гладкие, аккуратные модели с высокой детализацией.
- *Высокая точность:* Точный впрыск и свойства материала позволяют получать модели с высокой степенью проработки и тонкими стенками (600 мкм и меньше в зависимости от геометрии и материала).
- *Чистота:* Возможность применения в офисном помещении, отсутствие контакта с жидким фотополимером, легкое удаление поддержек и простая замена головок.
- *Быстрота:* Быстрый процесс благодаря высокой скорости печати, возможности печати сразу нескольких деталей и отсутствию необходимости последующего доотверждения.

- *Универсальность:* Удобство, легкость и быстрота замены модельного материала, широкий выбор материалов FullCure позволяют получать детали с различной геометрией, механическими свойствами и цветом. При этом материал поддержек для всех типов модельных фотополимеров остается один и тот же.

Рассматриваемая нами технология быстрого прототипирования (3D печать) базируется на технологии Objet PolyJet, печать фотополимером. Технология позволяет формировать модель послойно с толщиной слоя до 16 мкм, с исключительно мелкими деталями и очень маленькой толщиной стенки обычно до 0,1 - 0,3 мм (точность зависит от геометрии, расположения деталей и размера модели). Примеры деталей, изготовленных с помощью 3D печати, представлены на рисунке 5.



Рисунок 5 – Детали, получаемые 3D печатью

## **2 Технология производства деталей с помощью аддитивных технологий**

Технология непосредственного производства детали условно разделяется на следующие этапы:

**1-ый этап** - этап конструирования, который начинается с выбора САД-системы: по имеющимся чертежам воссоздать 3D прототип реальной детали, либо же использовать современный подход и применить систему 3D сканирования, которая позволяет решить задачу обратного инжиниринга (реинжиниринга). В результате на выходе получаем объемную модель детали.

**2-ой этап** – этап проведения расчетов с помощью САЕ-системы. Смоделированную 3D модель детали планируется интегрировать в САЕ-систему ProCast, которая позволяет проанализировать и полностью смоделировать существующий технологический процесс заливки, рассчитать коэффициент усадки, на который вносится поправка при реальном литье, определить эффективность стояка, прибылей и питателей, выявить пустоты, проанализировать скорость остывания заливки и прочее. Данный шаг является очень важным этапом, так как определяет конечный результат всего процесса заливки и от того насколько грамотно проанализирована виртуальная технология литья зависит процент выходной годной продукции.

**3-ый этап** – этап изготовления мастер-модели с помощью 3D-принтера Objet Eden 350, по технологии PolyJet, работающей по принципу послойного нанесения фотополимерных материалов на платформу с ультратонким слоем толщиной 16 мкм.

**4-ой этап** – этап создания силиконовых эластичных пресс-форм по получаемой мастер-модели и последующее вакуумное литье в них полиуретановых смол, литейного воска и других полимерных композиций.

Изготовление и силиконовых форм, и восковых моделей осуществляется на установке для вакуумного литья полимеров в эластичные формы МТТ С4/05.

**5-ий этап** – этап изготовления оболочковых форм для литья по выплавляемым моделям.

**6-ый этап** – этап литья по выплавляемым моделям с применением вакуумной машины ProfiCast SGA 3500 для литья металлов.

Перейдем к рассмотрению технологии изготовления детали типа «Крыльчатка» для мини-ГТД.

Получив 3D модель детали, в нашем случае это крыльчатка микро ГТД (рисунок 6), приступаем к моделированию процесса литья с помощью САЕ-программы ProCast.

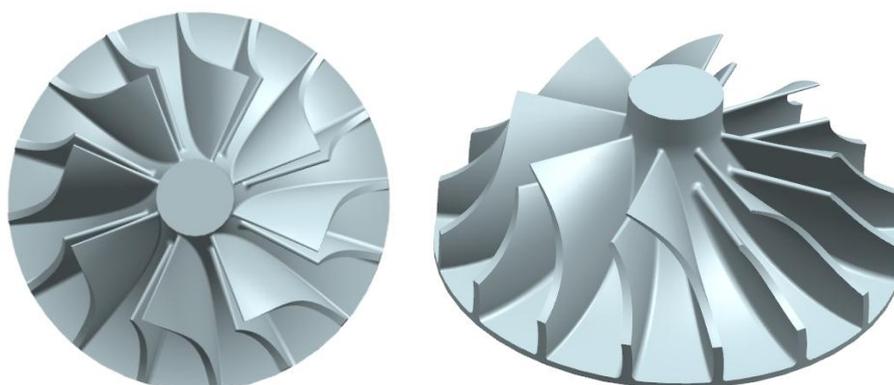


Рисунок 6 – 3D модель «Крыльчатка»

Компьютерный анализ литейных процессов на этапе проектирования технологии литья (до изготовления отливок) позволяет минимизировать возможные просчеты и ошибки, неизбежно возникающие в процессе разработки, снизить финансовые и временные затраты, повысить эффективность, конкурентоспособность, качество и надежность разрабатываемой продукции.

При использовании аддитивных технологий все стадии реализации проекта от идеи до материализации находятся в единой технологической среде, технологической цепи, где каждая технологическая операция также моделируется в CAD\CAM\CAE-среде.

В традиционном литейном производстве существует практика проб и ошибок. Слабое место этого подхода в том, что если технолог не уверен в «технологичности» отливки, предложенной конструктором, доказать необходимость внесения изменений чаще всего удается только после множества неудачных пробных заливок (рисунок 7).

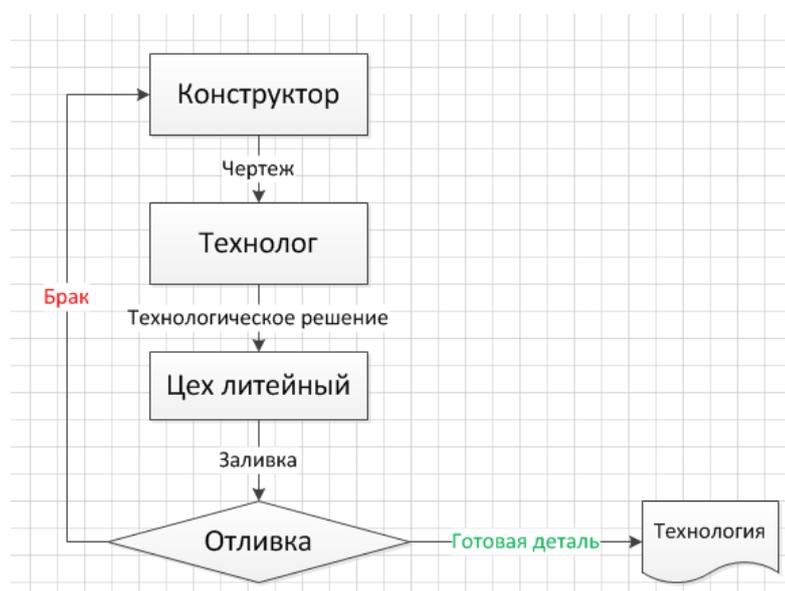


Рисунок 7 – Разработка технологии методом проб и ошибок

Разбивая производство продукции на два этапа: этап виртуального моделирования (CAD) и расчета (CAE) изготавливаемой детали, позволяющий точно провести необходимые инженерные расчеты, в т.ч. нагрузки, уровни срезов, взаиморасположение различных частей и объектов (Unigraphics, SolidWorks и пр. - профессиональные CAD-системы 3D проектирования), просчитать прочность, надежность, смоделировать кинематику движений виртуального прототипа (Ansys - универсальная программная CAE-система конечно-элементного анализа), проанализировать

технологический процесс заливки полученной заготовки (ProCast - программный САЕ-комплекс, позволяющий решать как технологические задачи, связанные с литьем металлов, так и с моделированием любых литейных технологий) и этап реального производства, позволяющий на основании и с учетом рекомендаций и поправок на этапе виртуального моделирования изготавливать изделия с наименьшими затратами как ресурсов, так и финансов, делая процесс производства проще, дешевле и быстрее.

Процесс начинается с передачи 3D-модели и чертежа детали в технологическое бюро цеха и отдел САПР. Технологи литейного цеха согласуют с цехом механической обработки конфигурацию будущей отливки – определяют припуски на механическую обработку. Результаты согласования (в виде эскиза) и свои соображения относительно технологии производства отливки технологи литейного цеха передают в отдел САПР для моделирования и разработки технологии (рисунок 8).



Рисунок 8 – Разработка технологии изготовления отливок с использованием аддитивных технологий

Основным этапом при моделировании процессов литья служит процесс выбора литниково-питающих систем.

Литниково-питающая система (ЛПС) служит для обеспечения заполнения литейной формы металлом с оптимальной скоростью, исключая образование в отливке недоливов и неметаллических включений, и компенсации объемной усадки в период затвердевания отливки с получением в ней металла заданной плотности. ЛПС должна также удовлетворять требованиям технологичности при изготовлении моделей, форм и отливок. При этом необходимо стремиться к созданию по возможности компактных ЛПС. Излишнее их развитие ведет к перерасходу металла, завышению затрат труда, низкой эффективности использования оборудования и площадей.

Конкретная литая деталь представляет собой оригинальную конструкцию, что приводит к необходимости создания самостоятельной ЛПС для каждой отливки. Вместе с тем литые детали имеют много общего в размерах стенок, узлов, их сочленений, благодаря чему открываются возможности для типизации конструкций ЛПС и выработки общих методов их расчета.

Разработку ЛПС на конкретные машиностроительные и приборостроительные отливки целесообразно выполнять в четыре этапа: выбор типа системы, расчет элементов питания, расчет литниковых каналов, анализ систем.

Приступаем к выбору и расчету ЛПС.

## **2.1 Расчет и проектирование ЛПС**

*По гидродинамическому признаку* различают литниковые системы сужающиеся, расширяющиеся и равного сечения.

В сужающихся литниковых системах суммарные площади сечения элементов последовательно уменьшаются от стояка к литниковому ходу и питателю, т. е.  $\sum F_{ст} > \sum F_{лх} > \sum F_{пит}$ . В таких литниковых системах все каналы полностью заполнены расплавом. Это создает благоприятные возможности для всплывания шлаковых и песчаных частиц в горизонтальных каналах литниковой системы. Однако при сужении каналов скорость потока расплава возрастает и это создает трудности обеспечения спокойного заполнения формы. Применение раструбных (расширяющихся к выходному сечению) питателей позволяет устранить этот недостаток, сохраняя достоинства сужающихся литниковых систем. Такие литниковые системы в стальном лите применяют при изготовлении мелкого и частично среднего литья, когда заливку форм осуществляют из поворотных ковшей.

В расширяющихся литниковых системах суммарные площади сечения их элементов последовательно увеличиваются от стояка к литниковому ходу и питателю, т. е.  $\sum F_{ст} < \sum F_{лх} < \sum F_{пит}$ . В таких литниковых системах скорость потока расплава в каналах постепенно снижается, и жидкий металл поступает в полость формы спокойно, без разбрызгивания. При разливке стали из стопорных ковшей, когда струя расплава попадает в форму с большой скоростью, требование спокойного заполнения становится определяющим. Поэтому расширяющиеся литниковые системы применяют прежде всего при изготовлении крупного и большей части среднего стального литья. Однако в этом случае возникает опасность неполного заполнения каналов литниковой системы, особенно литникового хода и питателей.

В литниковых системах равного сечения суммарные площади всех элементов одинаковы, т. е.  $\sum F_{ст} : \sum F_{лх} : \sum F_{пит} = 1:1:1$ . Их применяют в условиях стопорной разливки при производстве крупных стальных отливок, когда каналы литниковой системы выполняют с использованием составных

нормализованных керамических изделий в виде воронок, трубок, тройников, звездочек и щелевых питателей. Применение керамических изделий предотвращает эрозионное разрушение формы. Однако из-за их высокой стоимости, а также повышения трудоемкости изготовления форм литниковые системы равного сечения применяют в особых случаях, если другие варианты выполнения литниковых систем не обеспечивают получение отливки требуемого качества.

*По пространственно-конструктивному признаку* литниковые системы классифицируют на верхнюю, боковую (верхне-, средне- и нижне-боковую), ярусную (сифонную, щелевую и комбинированную).

Выбор того или другого типа литниковой системы зависит от многих факторов, главными из которых являются: положение отливки в форме и наличие разъема формы; габаритные размеры и конфигурация отливки; предъявляемые к отливке требования (ответственная или неответственная отливка); свойства сплава; возможности питания отливки прибылями; удобство отделения питателей от затвердевшей отливки.

*Верхняя литниковая система* (рисунок 9, а) обеспечивает хорошую заполняемость при кратчайшем пути металла до формы, создает наиболее благоприятные условия для последовательной направленной кристаллизации отливки снизу к прибылям, не вызывает развития местных перегревов формы и связанных с этим дефектов. Она наиболее проста по выполнению, легко удаляется при обрубке литья и требует наименьшего по сравнению с другими типами литниковых систем расхода металла за счет уменьшения размеров прибылей. Основным недостатком этого типа систем — каскадный сброс расплава в форму, приводящий к его интенсивному перемешиванию и окислению, захвату воздуха, образованию пены и ее замешиванию внутрь отливки. При верхней литниковой системе ухудшаются также условия задержания шлака в коллекторе, так как питатели большую часть времени

заливки не могут работать под затопленный уровень. Кроме того, верхняя литниковая система создает опасность размыва формы и стержней падающим с большой высоты потоком металла.

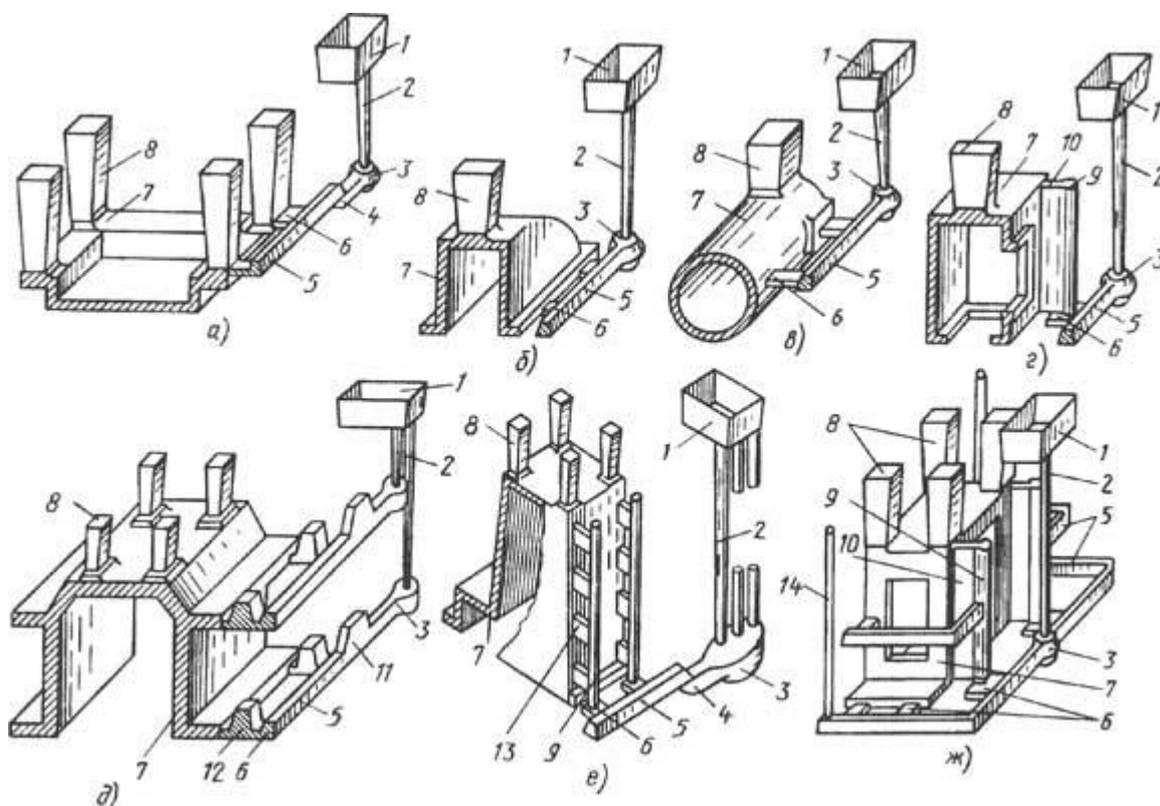


Рисунок 9 - Типы литниковых систем: а — верхняя; б — нижняя; в — боковая (по разьему); г — вертикально-щелевая; д и е — ярусные соответственно с горизонтально и вертикально расположенными питателями; ж — комбинированная; 1 — чаша; 2 — стояк; 3 — зумпф; 4 — металлоприемник (промежуточный канал); 5 — коллектор; 6 — питатель горизонтальный; 7 — отливка; 8 — прибыли; 9 — колодец (обратный стояк); 10 — вертикальная щель; 11 — шлакосборник над коллектором; 12 — шлакосборник над питателем — питающая бобышка; 13 — питатель вертикальный; 14 — выпор

Отмеченные недостатки верхней литниковой системы в значительной мере могут быть устранены при заливке форм в наклонном положении или при выполнении заливки с кантовкой. Поэтому верхнюю литниковую

систему часто применяют для отливок с высотой до 100 мм, а также при литье мелких деталей в кокиль, кантовку которого обеспечивать значительно проще, чем кантовку песчаной формы.

*Нижняя литниковая система* (рисунок 9, б) в наибольшей степени обеспечивает спокойное заполнение формы расплавом, исключая его вспенивание, разбрызгивание и окисление, хорошо задерживает неметаллические включения, находящиеся в расплаве до его поступления в форму, способствует удовлетворительной заполняемости и последовательному вытеснению воздуха и газов из полости формы. Нижняя литниковая система легко удаляется при обрубке, а расход металла на нее меньше, чем на вертикально-щелевую систему.

Однако при такой литниковой системе из-за перегрева нижних слоев формы могут нарушиться тепловой режим охлаждающейся отливки и, следовательно, самый ход последовательной направленной кристаллизации, что может привести к образованию усадочных раковин и рыхлот. Чтобы избежать образования этих дефектов, применяют *холодильники*, устанавливая прибыли увеличенных размеров или доливают их горячим металлом. Но этих мер может оказаться недостаточно при литье сплавов с широким температурным интервалом кристаллизации, склонных к образованию рассеянной усадочной пористости. Кроме того, при нижней литниковой системе трудно обеспечить заполняемость тонкостенных высоких отливок с развитой поверхностью. Поэтому при  $h_{\text{отл}}/\delta_{\text{отл}} > 50$  (где  $h_{\text{отл}}$  — высота отливки без прибылей;  $\delta_{\text{отл}}$  — средняя толщина стенки) для обеспечения заполняемости формы применяют вертикально-щелевую или комбинированную систему. Такой тип литниковой системы в наибольшей степени отвечает требованиям, предъявляемым к литниковым системам, и поэтому получил наибольшее распространение для литья цветных сплавов.

*Боковая литниковая система* (рисунок 9, в) обеспечивает заполнение нижней части отливки сверху, а верхней части — снизу. Преимущество системы — удобство выполнения в форме.

*Вертикально-щелевая литниковая система* (рисунок 9, г) наряду со спокойным вводом расплава в форму обеспечивает хорошую заполняемость форм тонкостенных отливок, задерживает неметаллические включения при отшлаковывании в коллекторе и вертикальном колодце, создает благоприятные условия для последовательной, направленной снизу вверх кристаллизации отливок, обеспечивая подачу горячего металла в верхние слои отливки и прибыль. Таким образом, этот тип литниковой системы обеспечивает лучший тепловой режим и лучшую заполняемость тонкостенных высоких отливок, чем нижняя литниковая система.

К недостаткам вертикально-щелевой системы относятся: возможность вспенивания сплава в начальный момент заполнения формы и опасность возникновения местных перегревов формы в области, прилегающей к вертикальным щелям, приводящих к образованию дефектов усадочного характера, а также сложность ее выполнения в форме и удаления при обрубке.

Вертикально-щелевая литниковая система наиболее эффективна при литье высоких тонкостенных ( $h_{\text{отл}}/\delta_{\text{отл}} > 50$ ) отливок цилиндрической и коробчатой форм, а также при литье мелких и средних отливок в кокили, наклоняемые для устранения опасности вспенивания расплава в начальной стадии заполнения.

*Ярусная литниковая система* (рисунок 9, д и е) создает благоприятные условия для заполнения формы и кристаллизации отливки, так как наиболее горячие порции расплава поступают в верхнюю часть, а последовательная заливка снизу способствует спокойному заполнению и

вытеснению воздуха. Недостаток этой системы — сложность ее изготовления, так как в этом случае необходимы несколько горизонтальных разъемов формы. Преимущественное применение ярусной системы — при литье в кокили с вертикальным разъемом. Кроме того, может использоваться при литье крупных высоких и тонкостенных отливок в песчаные формы.

*Комбинированная литниковая система* (рисунок 9, ж), в которой сочетаются несколько типов систем, например, нижняя система с вертикально-щелевой обладает преимуществами этих систем. В этом случае форма спокойно заполняется расплавом, рационально распределяется температура по сечению отливки и тем самым обеспечивается ее последовательная кристаллизация. Эту систему применяют преимущественно для заливки крупногабаритных отливок сложной конфигурации в песчаных формах, особенно в тех случаях, когда площади горизонтальных сечений отливки резко меняются с ее высотой. Недостаток комбинированной системы — сложность выполнения и удаления ее при обрубке, а также повышенный расход металла.

При машинной формовке в большинстве случаев применяется горизонтальная литниковая система, которая характеризуется подводом расплава по разьему формы. В критериях массового и крупносерийного производства отливок из сероватого чугуна массой до 200 кг применяется горизонтальная дроссельная литниковая система, обеспечивающая не плохое очищение расплава от сторонних включений и поболее плавное его поступление в форму, что исключает размывы и разрушения ее отдельных частей. Подвод расплава на нескольких уровнях используется при получении сложных и больших отливок большой массы (станины станков, основания машин и т. п.), когда формовка ведется при помощи пескомета. Огромное количество питателей и их размещение на различной высоте отливки делает

возможность заполнить форму расплавом до этого, чем он начнет терять жидкотекучесть.

При конструировании литниковой системы необходимо придерживаться ряда правил:

1. Протяженность каналов литниковой системы должна быть короткой и жидкий металл необходимо подводить к полости формы кратчайшим путем. Для этого следует разместить отливки на плоскости разъема формы максимально плотно, но с соблюдением требуемых дистанций между отливками, отливками и элементами литниковой системы, между отливками и краем опоки. Затем необходимо выбрать рациональную траекторию литникового хода. В частности, при изготовлении отливок, имеющих конфигурацию тел вращения и наружный диаметр не более 700 мм, наиболее рациональным является подвод металла в центральную часть отливки. При наружном диаметре в пределах 700—1000 мм металл к отливке необходимо подводить с внешней стороны отливки через подковообразный литниковый ход.

При большем наружном диаметре отливок целесообразно применять комбинированный подвод металла — в центральную часть и с внешней стороны. Размещение литникового хода вдоль внешнего контура применяют так же при изготовлении отливок коробчатого типа. При изготовлении в одной форме нескольких отливок желательно разместить их симметрично относительно литникового хода, а стояк — в центре ветвей литникового хода.

2. Поток металла, подводимый в полость формы, должен быть направлен вдоль стенки отливки или касательно (тангенциально) к ней, но никак не перпендикулярно к поверхности стержня или стенки формы. Для

этого необходимо подводить металл в торцевые части плоских стенок отливки или касательно к средней оси сечения отливок тел вращения.

3. Подвод металла должен обеспечивать одностороннее движение металла в форме. При этом для отливок тел вращения одностороннее движение должно трансформироваться во вращательное. Встречное движение потоков допускается, если их головные части затем сливаются в прибыль, выпор или другую вспомогательную емкость.

4. Нежелательно размещать элементы литниковой системы вблизи знаков стержней (из-за ухудшения условий газоотвода из формы) и холодильников (из-за снижения эффективности их работы), а также жеребеек (из-за опасности их проплавления и обусловленного этим смещения стержня).

5. Подвод металла осуществляют в наиболее массивную часть отливки, если толщина ее стенок различается незначительно, и, наоборот, металл подводят к тонким стенкам, если их толщины существенно различаются. Первая часть правила обусловлена необходимостью обеспечения направленного затвердевания отливки, поскольку при незначительной разнице в толщине ее стенок это является наиболее актуальной задачей. Вторая часть правила обусловлена необходимостью уменьшения градиента температур в различных частях отливки из-за опасности возникновения трещин. При сильно различающихся толщинах актуальной становится уже проблема снижения термических напряжений, поскольку условие направленного затвердевания выполняется заведомо. При значительной разнице толщин рекомендуется наряду с подводом металла в тонкие части ускоренно охлаждать массивные, обеспечивая направленное к прибыли последовательное затвердевание отливки.

Выбор литниковой системы определяется конструкцией самой отливки. Чрезвычайно важно совместить этот процесс с процессом выбора разъема формы и предусмотреть, чтобы массивные части отливки, требующие питания из прибыли, располагались вверху, а протяженные плоские стенки наклонно или вертикально.

В стальном литье наиболее часто применяют нижнебоковую (для невысоких отливок) или ярусную (для отливок средней и большой высоты) литниковую систему. При малой толщине стенки отливки предпочтительнее применять вертикально-щелевую литниковую систему. Если отливка снизу не имеет горизонтальной стенки, то вместо нижнебоковой применяют сифонную литниковую систему. Причем питатель может охватывать весь нижний контур отливки, трансформируясь в щелевой питатель. Комбинированную литниковую систему выбирают, если разные части отливки требуют различных условий заполнения.

Если возможно технологически, то целесообразно применять литниковые системы, содержащие элементы нижнего или сифонного подвода металла, которые обеспечивают заполнение полости формы под затопленный уровень. В этом случае даже при применении расширяющихся литниковых систем литниковый ход и питатели оказываются всегда заполненными, как при использовании сужающихся литниковых систем. Поэтому, при условии заполнения полости формы жидким металлом под затопленный уровень, во всех случаях следует применять расширяющиеся литниковые системы и соотношение площадей сечений элементов выдерживать в следующих пределах:

$$\sum F_{ст} : \sum F_{лх} : \sum F_{пит} = (1 : 1,3 : 1,5) \dots (1 : 1,5 : 2)$$

При изготовлении крупных стальных отливок ответственного назначения каналы литниковой системы выполняют из огнеупорных трубок.

При этом площади элементов литниковой системы принимают одинаковыми или кратными:

$$\sum F_{\text{ст}} : \sum F_{\text{лх}} : \sum F_{\text{пит}} = (1:1:1) \dots (2:2:2)$$

Если по технологическим условиям не удастся сконструировать литниковую систему с подводом жидкого металла в нижние горизонты отливки, а заливка осуществляется из поворотного ковша, то литниковую систему выполняют сужающейся. Такие ситуации могут возникать при изготовлении мелкого и, частично, среднего литья. В этих случаях обычно рекомендуют следующее соотношение площадей сечений элементов литниковой системы:

$$\sum F_{\text{ст}} : \sum F_{\text{лх}} : \sum F_{\text{пит}} = (1,1:1,05:1) \dots (1,4:1,2:)$$

Для снижения скорости потока жидкого металла на входе в полость формы, особенно при использовании сужающихся литниковых систем, питатели выполняют в виде раструбов с увеличением площади выходного сечения в 1,2—1,3 раза

#### *Элементы питания отливок*

Не считая каналов, подводящих расплав в форму, при получении мощных металлических, железных и отливок из цветных сплавов в форме устраивают дополнительные каналы и полости, заполняемые расплавом во время заливки, которые служат для питания отливки в процессе ее остывания и для борьбы с усадочными раковинами. К элементам питания относятся выпоры, питающие бобышки и прибыли. Выпор — круглый вертикальный канал, устраиваемый в верхней полуформе над более высочайшими частями отливок. Сначала заливки расплава в форму он служит для удаления газов. После наполнения формы расплавом выпор позволяет найти момент

окончания процесса заливки и питает отливку во время ее застывания. Выпоры используют при получении металлических отливок.

Питающая бобышка (рисунок 10) — полость шаровой формы, заполняемая расплавом и служащая для питания отливки при ее остывании (усадке), что предупреждает образование усадочных раковин. Литниковые системы с питающими бобышками используют при получении отливок из ковкого и отчасти из сероватого чугуна.

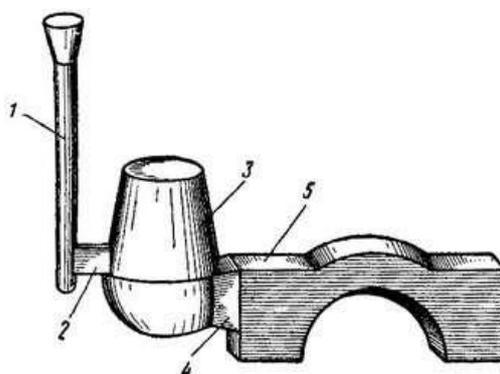


Рисунок 10 - Питающая бобышка, используемая при получении отливок из ковкого чугуна: 1 — стояк, 2 — питатель, 3 — питающая бобышка, 4 — шея питающей бобышки, 5 — отливка

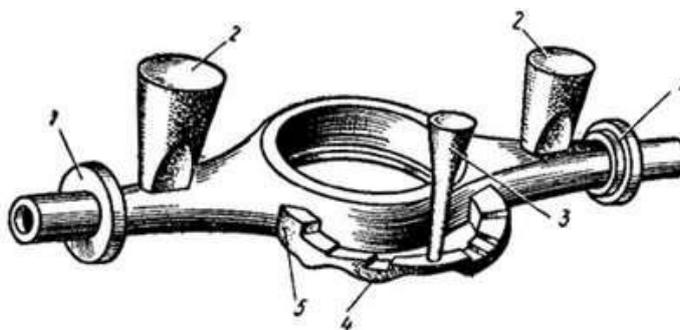


Рисунок 11 - Отливка картера заднего моста автомобиля: 1 — холодильники, 2 — прибыли, 3 — стояк, 4 — шлакоуловитель, 5 — питатель

Прибыль (рисунок 11) — дополнительная мощная часть отливки (заполняемая расплавом полость формы), созданная для питания мощных ее частей в процессе затвердевания (усадки). Открытые прибыли

цилиндрической либо прямоугольной формы устраивают над верхними громоздкими местами отливок, а закрытые шаровидные (внутренние) — поблизости их. Размеры прибылей и их размещение выбирают так, чтоб расплав в их застывал в последнюю очередь. Благодаря этому усадочная раковина появляется в прибылях, а отливка окажется плотной и без изъянов усадочного происхождения. После остывания отливки прибыль отрезают дисковыми пилами либо газовой резкой. Прибыли в большинстве случаев используют для отливок, получаемых из стали и цветных сплавов.

### *Расчет частей питания отливок*

При установлении размеров выпоров и прибылей исходят из того, что расплав в элементе питания должен затвердевать позднее питаемой громоздкой части отливки, а его объем должен быть достаточным для компенсации ее усадки. При установлении размеров питающих выпоров (рисунок 12 а) руководствуются шириной питаемого тела отливки. Размеры выпоров и прибылей определяют по формулам, графикам и заводским нормам. Размеры ободенных открытых прибылей нередко находят способом построения вписанных окружностей (рисунок 12 б). Если вписать в питаемый узел окружность поперечником  $d$ , то во всех сечениях по направлению ввысь — прибыли необходимо дать такие припуски металла с необходимыми уклонами, чтоб поперечник каждой выше расположенной вписанной окружности был больше поперечника предшествующей, т. е.,  $d < d_1 < d_2$  и т. д. Между отливкой и прибылью дается припуск на отрезку шириной 20—40 мм. Уклон стен прибыли обычно принимают равным  $5^\circ$ .

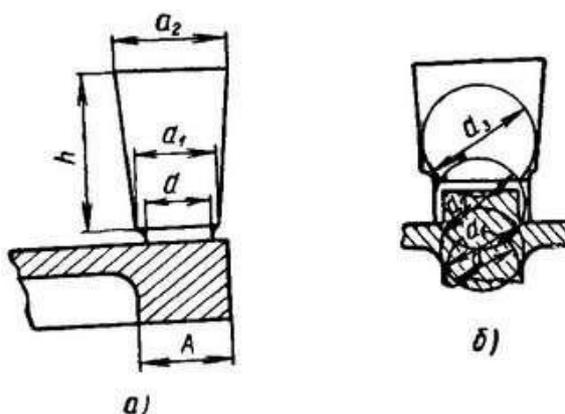


Рисунок 12 - Главные размеры питающих выпоров (а) и схема для установления размеров открытой прибыли способом вписанных окружностей (б)

У сталей общая объемная усадка (в жидком состоянии и при затвердевании) в зависимости от химического состава достигает 4—7 %. При производстве отливок она проявляется в виде усадочных раковин и усадочных пор. Чем крупнее отливка и больше ее толщина, тем больших размеров формируется усадочная раковина, а также протяженнее становится зона усадочной пористости. В стальных отливках усадочные раковины не допускаются. А усадочная пористость частично может допускаться, но это зависит от уровня требований, предъявляемых к отливкам: чем эти требования выше, тем ниже допустимая пористость.

Поэтому для получения качественных по усадочным дефектам отливок необходимо, как правило, компенсировать объемную усадку стали. Исключение составляют мелкие отливки с одинаковой небольшой толщиной стенок, у которых усадочные раковины вследствие малости размеров трансформируются в усадочные поры.

Процесс компенсации объемной усадки сплава при литье называют питанием отливки. Источником питания служит прибыль. Прибыль это элемент литниковой системы для питания отливок в период затвердевания с целью предупреждения образования усадочных раковин. При заливке формы металлом в прибыли происходит накопление жидкого металла, идущего на

компенсацию объемной усадки затвердевающей отливки. После формирования отливки прибыль отделяют от нее, как и всю литниковую систему, и утилизируют.

Для эффективной работы прибыли необходимо обеспечивать направленность затвердевания металла в полости формы от торцевых частей или периферийных областей к внутренним, от тонких стенок к толстым, а от самой толстой части отливки к прибыли. При наличии протяженных стенок одинаковой толщины направленность затвердевания создают утолщением стенки в направлении к прибыли. Этому же способствует интенсивное охлаждение периферийных областей и замедленное около прибыльных областей.

Часть отливки, затвердевающую в последнюю очередь, называют тепловым, центром. Он требует питания от прибыли. При этом количество прибылей обычно равно числу тепловых центров. Требуют питания и отливки, имеющие толстые протяженные стенки одинакового сечения, хотя они не имеют явных тепловых центров. В зависимости от размеров таких стенок и их расположения в форме для питания используют одну и более прибылей. При этом каждая прибыль действует автономно и имеет свою зону питания. В отливках с сочленениями стенок разной толщины части отливки с большей толщиной стенок могут выполнять функции прибыли. В этом случае для них общим тепловым центром становится часть отливки с максимальной толщиной стенок.

Для полноценного обеспечения питания отливки, снижения расхода металла, а также для удобства выполнения технологических операций при формовке и финишной обработке отливок прибыли должны отвечать следующим требованиям:

1. Металл в прибыли всегда должен затвердевать позже, чем в тепловом центре зоны питания.

2. Количество жидкого металла в прибыли должно быть достаточно для полной компенсации объемной усадки металла отливки или ее питаемой части.

3. Уровень металла в прибыли всегда должен быть выше уровня металла в питаемом узле.

4. Геометрия прибыли, ее расположение в форме и сочленение с отливкой должны быть технологичными, т. е. обеспечивать удобство формовки, а также легкость отделения прибыльной части от отливки.

5. Прибыль должна быть экономичной, т. е. расход металла на питание отливки должен быть минимальным.

## **2.2 Расчет прибылей отливок**

В процессе проектирования технологического процесса изготовления отливки инженер-технолог сталкивается с множеством вопросов: выбор места подвода металла, назначение технологических напусков, обеспечение направленного затвердевания и питания отливок, обеспечение заполняемости полости формы и др. Одним из наиболее важных этапов в этой последовательности, безусловно, является вопрос обеспечения питания тепловых узлов отливки. На данном этапе инженер-технолог должен выбрать место установки прибыли, конфигурацию прибыли и рассчитать ее размеры с целью исключения возникновения усадочных дефектов в отливке.

В литературе приняты следующие признаки классификации прибылей:

- по месту расположения: верхние и боковые (отводные);

- по способу заполнения расплавом: проточные (проливные) и сливные;
- по тепловому состоянию: обычные, утеплённые и обогреваемые;
- по характеру взаимодействия с атмосферой: открытые и глухие;
- по способу отделения от отливки: отрезные и отбивные (легкоотделяемые).

Схемы, приведённые на рисунке 13, дают наглядное представление об особенностях некоторых из указанных прибылей.

Верхние прибыли (2, 6) установлены на тепловых узлах отливок, а боковые (1, 3) - сбоку тепловых узлов. В проточную прибыль (1,6) металл попадает непосредственно из питателя и только затем в отливку. Сливная же прибыль (2, 3) заполняется поступающим из отливки и уже частично охлаждённым расплавом. Проточные прибыли всегда горячее тепловых узлов и поэтому более эффективны, чем относительно холодные сливные. Прибыли часто утепляют, окружая их мало-теплопроводной формовочной смесью, или обогревают, используя различные экзотермические материалы, а также электрический нагрев. Применение таких прибылей, называемых соответственно утеплёнными или обогреваемыми, позволяет получить существенную экономию металла при одновременном повышении их эффективности. В открытой прибыли (2) зеркало жидкого металла испытывает непосредственное давление атмосферного воздуха, что в принципе благоприятно сказывается на питании отливки. Однако интенсивное охлаждение расплава из-за радиационного и конвективного теплоотвода в окружающую среду приводит к тому, что эти прибыли оказываются всё же менее действенными по сравнению с закрытыми (1,3,6).

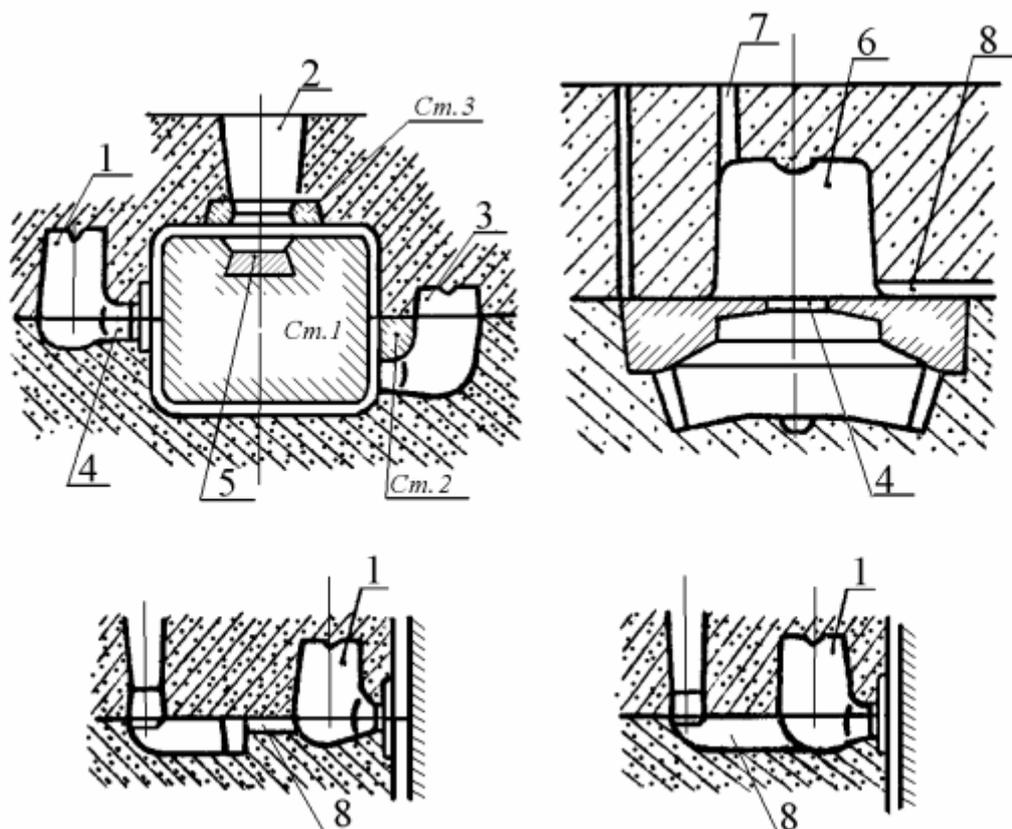


Рисунок 13 - Схемы прибылей (неутепленных): 1,6 - проточная (проливная); 2 - верхняя, сливная, открытая; 3 - боковая, сливная, закрытая; 4 - шейка прибыли; 5 - холодильник; 6— легкоотделяемая, верхняя, проточная; 8 — питатель

При выборе расположения и конструировании прибылей необходимо руководствоваться следующими правилами:

1. Прибыли следует размещать над самыми массивными частями - тепловыми узлами отливки.

2. Если в отливке имеется несколько тепловых узлов, разделённых тонкими стенками, то на каждом из них необходимо устанавливать отдельную прибыль.

3. Прибыль должна занимать возможно более высокое положение. При этом открытые прибыли, устанавливаемые на верхних частях отливки, могут заменять выпоры.

4. Размещать прибыли следует так, чтобы при их отрезке, а также зачистке мест их установки, была исключена опасность повреждения поверхности отливки.

5. Прибыли необходимо располагать с таким расчетом, чтобы они не препятствовали свободной усадке металла.

6. Не желательно устанавливать прибыли рядом со стенками отливки или близко одну от другой, так как формовочная смесь находящаяся между ними, сильно перегревается. Это обуславливает опасность появления пригара на отливке и оказывает, во многих случаях, неблагоприятное влияние на условия ее охлаждения

7. Следует стремиться из одной прибыли питать по возможности большее число отливок.

8. Необходимо учесть, что расположение прибыли на необрабатываемой поверхности требует в последующем её зачистки, что увеличивает трудоёмкость изготовления отливки.

В настоящее время разработаны различные инженерные методы расчета прибылей. Часть из них связывает приведенный размер отливки (узла) и прибыли, часть – объем прибыли и питаемой отливки (узла). Большинство из данных соотношений найдено либо эмпирическим, либо полуэмпирическим способом. Рассмотрим некоторые из наиболее распространенных методов расчета прибылей.

### **Метод Пржибла**

Связывает объем прибыли с объемом отливки или узла отливки соотношением:

$$V_{np} = \frac{x \cdot \beta}{1 - x \cdot \beta} \cdot V_0 \quad (1)$$

где  $x$  - коэффициент неэкономичности прибыли, ( $3 < x < 12$ ),  $\beta$  - коэффициент усадки металла,  $V_0$  - объем отливки или узла отливки. Коэффициент неэкономичности прибыли  $x$  для открытой атмосферной прибыли рекомендуется брать от 9 до 12, для закрытой атмосферной - от 7,5 до 9, для экзотермических прибылей  $x = 3-4$ .

### **Метод Р. Намюра, Я.И. Шкленника**

Данная методика является полуэмпирической. В основу расчета положена формула Р. Намюра, которая была преобразована для инженерных расчетов Я. И. Шкленником к виду:

$$V_{\text{пр}} = m\xi R_{\text{узла}} \cdot 3(1 + \beta)^3 YZ + 3\beta \cdot (1 + 3 \cdot l_{\text{лин}}) \cdot V_{\text{отл}}, \quad (2)$$

$m$ -коэффициент неидентичности температуры металла в отливки прибыли к моменту завершения заполнения литейной формы;

$\xi = F^3_{\text{пр}}/V^2_{\text{пр}}$  - безразмерный коэффициент, характеризующий конфигурацию прибыли;

$\beta$  - объемная усадка сплава,  $\beta = \tau_{\text{э.т.у.}}/\tau_{\text{э.пр.}}$  - безразмерный коэффициент, учитывающий относительную продолжительность времени затвердевания;

$Z = b_{\text{ф.пр.}}/b_{\text{ф.т.у.}}$  - безразмерный коэффициент, характеризующий тепловое состояние прибыли и теплового узла;

$R_{\text{т.у.}}$  - приведенный размер теплового узла;

$\tau_{\text{э.т.у.}}$  и  $\tau_{\text{э.пр.}}$  - относительная продолжительность затвердевания соответственно теплового узла отливки и прибыли в зависимости от конфигурации при близких модулях;

$b_{\text{ф.т.у.}}$ ,  $b_{\text{ф.пр.}}$  - теплоаккумулирующая способность формы, контактирующая соответственно с тепловым узлом и прибылью.

Первый член уравнения отвечает условию позднего затвердевания прибыли по сравнению с тепловым узлом отливки, а второй соответствует максимально необходимому запасу расплава в прибыли, необходимого для компенсации усадки. Формула (2) позволяет определить размеры прибылей отливок любой конфигурации, из любых сплавов и для всех способов литья кроме литья под давлением.

### **«Американская» методика**

Приведенная ниже методика относится также к эмпирическому типу. В основу расчета объема теплового узла положен принцип Грум-Гржимайло, заключающийся в более позднем затвердевании прибыльной части отливки по сравнению с тепловым узлом.

$$V_{\text{прибыли}} = 2,15 \cdot V_c \cdot S_F^{-0,74} \quad (3)$$

где  $S_F = L+W$ ,  $T$  - фактор формы;

$L$ -условная длина теплового узла;

$W$ -условная ширина теплового узла;

$T$ -условная высота теплового узла;

$L_c = L \cdot W \cdot T$  -условный объем теплового узла.

На основании данной зависимости разработана номограмма, упрощающая вычисления.

### **Упрощенный метод УЗТМ**

Ориентировочно размеры прибылей стальных отливок с соотношением максимальной толщины стенки к минимальной не более 1,2...2 можно определить по формулам, разработанными УЗТМ.

$$D_{\text{пр}} = (0,4 \dots 0,45) \cdot V_{\text{ж}}^{1/3} + T \quad (4.1)$$

$$H_{\text{пр}} = (1,05 \dots 1,10) \cdot D_{\text{пр}}, \quad (4.2)$$

где  $D_{\text{пр}}$ , дм – диаметр шаровой прибыли или диаметр окружности, вписанной в

вертикальное сечение конической/призматической прибыли;

$T$ , дм - толщина стенки отливки;

$H_{\text{пр}}$ , дм – высота прибыли;

$V_{\text{ж}} = 100 \cdot M / 7 \cdot \eta$ , дм<sup>3</sup> – объем жидкого металла, необходимого для изготовления

отливок совместно с прибылями;

$M$ , кг – масса питаемого узла;

$\eta$  – технологический выход годного.

Данный метод имеет ограничения по конфигурации прибылей и принципу действия, сплаву. Применима к коническим или шаровым прибылям закрытого типа для стальных отливок.

При выводе приближённых расчётных выражений для определения размеров прибыли учитываются физические законы её теплового взаимодействия с отливкой, конфигурация, особенности усадочных процессов в металле и другие факторы.

Оптимальной можно считать такую конфигурацию прибыли, которая близка к естественной форме усадочной раковины. Этому условию наиболее полно отвечает расширяющийся кверху усечённый конус (коническая прибыль, рисунок 14) с углом наклона около 10°. На второе место можно поставить цилиндрическую закрытую прибыль, соединяющуюся с отливкой через шейку, диаметром  $d_m$  и длиной  $l_{\text{ш}}$  с плоским или вогнутым верхом и

атмосферным "болванчиком" (рисунок 10 в, г), более удобную при машинной формовке.

Имеющиеся в литературе данные об эффективности полусфероидальных (рисунок 14, д), горизонтально-цилиндрических (рисунок 14, с), а также шаровых прибылей ошибочны и их не следует применять.

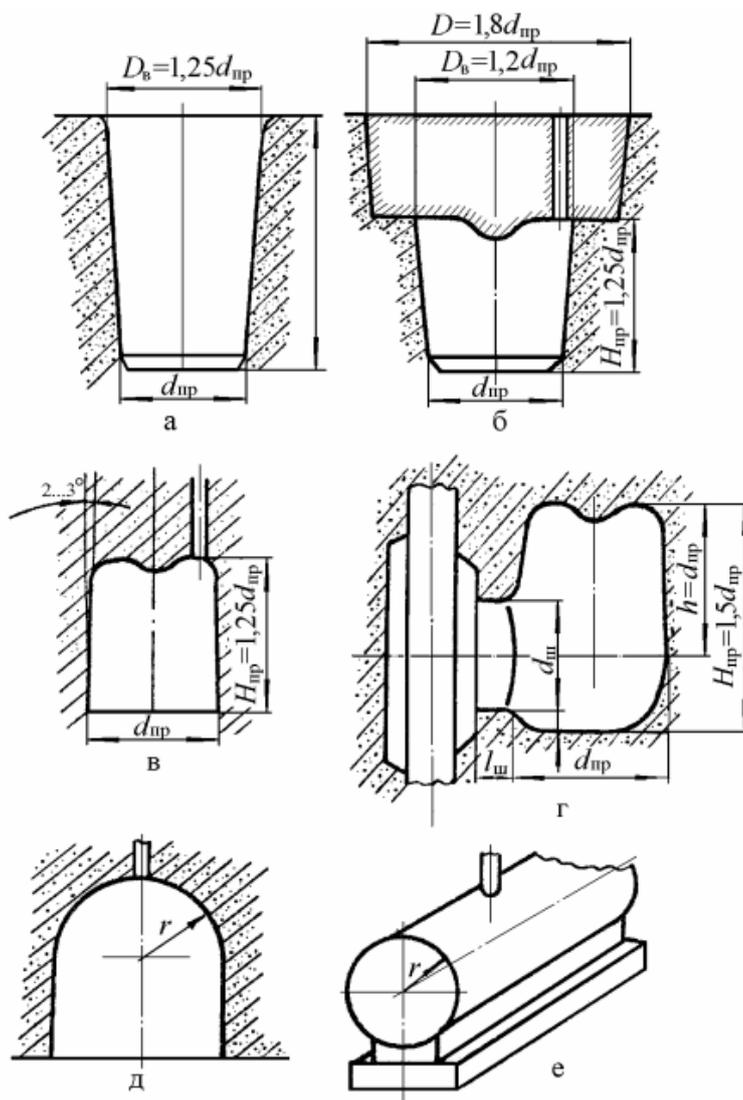


Рисунок 14 – Схемы рациональных (а, б, в, г) и нерациональных (д,е) конфигурации прибыли

*Рекомендуемые соотношения размеров прибыли:*

Для основы сплава из железа, никеля, меди, титана  $H_{\text{пр}}/d_{\text{пр}}$  открытая коническая: 1,8 ... 2,0, закрытая коническая: 1,2...1,25. Для основы сплава из алюминия открытая коническая: 1,2 ... 1,3, закрытая коническая: 1,2...1,3.

Конфигурацию прибыли характеризует  $\xi = F^3_{\text{пр}}/V^2_{\text{пр}}$ .

При расчёте  $\xi$  все размеры прибыли выражают через диаметр основания или ширину. Например, для цилиндрической закрытой прибыли при  $H_{\text{пр}} = 1,25 \cdot d_{\text{пр}}$ , коэффициент  $\xi$  определяется из формулы:

$$\xi = \frac{\left( \pi \cdot 1,25d_{\text{пр}} + \frac{\pi d_{\text{пр}}^2}{4} \right)}{\left( \frac{\pi \cdot d_{\text{пр}}^2}{4} \cdot 1,25d_{\text{пр}} \right)^2} = 108 \quad (5)$$

Влияние места подвода питателя к отливке на объём прибыли отражает коэффициент  $m$ . Для сливной прибыли, которая заполняется более холодным расплавом, величина  $m$  превышает единицу и тем больше, чем больше расстояние  $l_{\text{п}}$  между прибылью и питателем, выраженное через толщину стенки отливки  $\delta_{\text{отл}}$  (табл. 1). При заливке через прибыль значение  $m$  можно принять равным 0,9.

Таблица 1 - Зависимость коэффициента  $m$  от расстояния  $l_{\text{п}}$  между прибылью и питателем ЛС

$l_{\text{п}}$	Меньше $2\delta_{\text{отл}}$	$(2...5)\delta_{\text{отл}}$	$(5...10)\delta_{\text{отл}}$	$(10...20)\delta_{\text{отл}}$	$(20...30)\delta_{\text{отл}}$	$(30...40)\delta_{\text{отл}}$
$m$	1,0	1,03	1,05	1,10	1,15	1,20

Эффективную приведенную толщину теплового узла  $X_{\text{э.т.у}}$  можно найти:  $X_{\text{э.т.у}} = V_{\text{т.у}} / S_{\text{т.у}}$ .

Влияние конфигурации теплового узла на объём прибыли принятой конфигурации количественно отражает коэффициент:

$$y = \tau'_{\text{ту}} / \tau'_{\text{пр}}$$

, где  $\tau_{\text{ту}}$  и  $\tau_{\text{пр}}$  — соответственно относительные (по отношению к времени затвердевания шара) продолжительности затвердевания теплового узла (или всей отливки, если она имеет простую форму в виде плиты, цилиндра) и прибыли в зависимости от их конфигурации при равных или близких величинах приведенных толщин. В таблице 2 приведены значения коэффициентов  $m$  и  $\xi$ .

Таблица 2 - Значения коэффициентов  $m$  и  $\xi$  для различные прибыли

Вид прибыли	Эскиз прибыли	$m$	$\xi$
Верхняя открытая		314	1,2
Верхняя закрытая		117	1,2
Боковая закрытая		118	1,2

Литературные данные свидетельствуют, что при относительно малой интенсивности теплообмена, разные отливки с одинаковой приведённой толщиной  $X$  должны, независимо от конфигурации, теоретически затвердевать за одно и то же время. Между тем, при анализе обнаруживается заметное их несоответствие этому положению. Так, сопоставление продолжительности затвердевания отливок разной конфигурации и шара показало, что при равенстве величин  $X$  этот процесс у плиты неограниченной длины в 1,54, бруска прямоугольного сечения (соотношение длин сторон 1:4) в 1,42, бруска квадратного сечения в 1,27 раза идёт медленнее, чем у шара. В то же время относительно короткая цилиндрическая прибыль ( $H_{пр} = 1,25d_{пр}$ ) затвердевает несколько быстрее, чем шар ( $\tau_{пр} = 0,95$ ).

Безразмерный коэффициент  $Z$ , отражающий относительное тепловое состояние прибыли и теплового узла, может быть найден из выражения  $Z = q_{пр}/q_{уз}$ , где  $q_{пр}$  - плотности теплового потока соответственно на границах разделов "металл прибыли - форма" и "металл теплового узла - форма".

### **2.3 Конструирование литниковой системы**

ЛС должна обеспечить требуемый характер движения расплава и эффективное отделение неметаллических частиц от жидкого металла. Решение этой задачи достигается путем оптимизации конструкции, размеров и взаимного расположения элементов ЛС, а также переходов и сопряжения между ними.

Улавливание неметаллических частиц. Улавливание неметаллических частиц и шлака происходит преимущественно в литниковой чаше и шлакоуловителе. Возможности задержания шлака в стояке и питателях практически отсутствуют.

Литниковые чаши. Чашу литейной формы целесообразно конструировать так, чтобы при попадании в неё расплав приобрёл вращательное дви-

жение вокруг горизонтальной оси, облегчающее всплытие шлаковых частиц на поверхность металла.

С целью отделения зон вертикального и горизонтального завихрения металла в чаше можно предусмотреть вертикальную перегородку (рисунок 15,б), что также улучшает шлакоотделение.

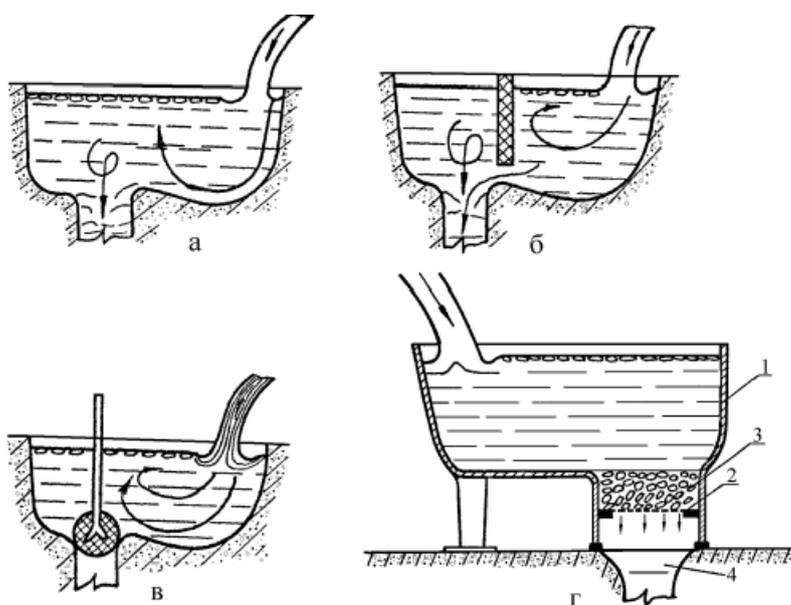


Рисунок 15- Схемы улавливания шлаковых включений в чашах: а - простая мача; б - чаша с перегородкой; в - чаша с пробкой; г - чаша с фильтром, 1 - окрашенная металлическая чаша; 2 - металлическая сетка; 3 - зернистый фильтр; 4 - литниковая воронка

Конструктивное оформление стояка, а также элементов сочленения стояка со шлакоуловителем, где происходит резкое изменение направления движения металла и возникают сильные возмущения в потоке, играет важную роль в формировании динамики потока во всей ЛС.

С точки зрения удобства извлечения стояка из полуформы при машинной формовке целесообразно было бы использовать стояки, расширяющиеся книзу или цилиндрической конфигурации. Однако оказалось, что такие стояки не обеспечивают благоприятных условий для заполнения форм, так как по всей их высоте при заливке металла возникает

разрежение. Вследствие этого происходит подсос воздуха в ЛС и насыщение расплава газом. В работе рекомендуется, учитывая изложенное, применять сужающиеся книзу конусные стояки с величиной уклона 18...35'.

Сложная картина потоков на начальном участке требует изыскания наиболее рациональных в гидравлическом отношении конструкций элементов для его построения. Наиболее простыми в конструктивном отношении являются начальные участки (рисунок 16): без расширения шлакоуловителя (рисунок 16а); с расширением шлакоуловителя (рисунок 16б); с расширением и возвышением дна шлакоуловителя (рисунок 16в); с одновременным расширением и углублением шлакоуловителя (рисунок 16 г).

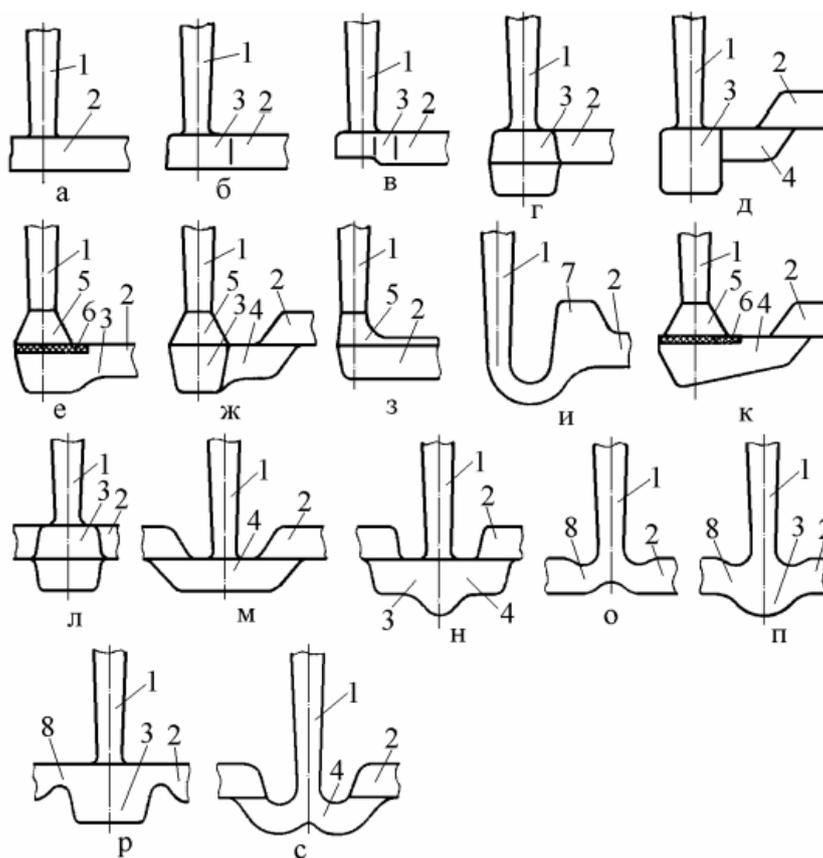


Рисунок 16 – Схемы конструкций начальных участков ЛС: 1 - стояк; 2 - шлакоуловитель; 3 - зумпф; 4 - металлоприёмник (промежуточный канал); 5 - расширение в нижней части стояка; 6 - фильтровальная сетка; 7 - шлакоборннк; 8 - дроссель (перезжим)

Начальные участки (рисунок 1б д, ж, и, к, м, н, с) позволяют вводить расплав в шлакоуловитель снизу вверх, что обеспечивает лучшее отделение шлаков и одновременно создаёт дополнительные гидравлические потери при входе расплава в шлакоуловитель, снижающие скорость потока в нём

В системе (рисунок 1би) над шлакоуловителем предусмотрено возвышение (шлакосборник), которое уменьшает удар потока расплава о потолок шлакоуловителя и, кроме того, задерживает образующуюся пену. Системы (рис. 8е, ж, к), стояки которых в нижней части имеют расширение, позволяют устанавливать в их основании фильтровальные сетки.

Начальные участки (рисунок 1бо,п,р), имеющие естественные сужения, способствуют плавному вводу расплава в шлакоуловитель (при раздвоении потока) и уменьшают образование пены и вакуума в местах сочленения стояка с горизонтальным каналом. Плавный переход от стояка к шлакоуловителю (рисунок 1бз), уменьшает разбрызгивание расплава внизу стояка, однако развивает большую скорость при входе в шлакоуловитель, так как гидравлические потери в этой системе резко снижаются, по сравнению с обычной системой (рисунок 1ба).

#### *Коэффициент расхода литниковой системы*

Действительную скорость движения расплава  $W$  в том или ином сечении ЛС определяют по известной формуле:

$$W = \mu \sqrt{2gH_p}, \quad (6)$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода;  $H_p$  - расчётный напор.

Коэффициент расхода  $\mu$  учитывает все потери напора в литниковой системе и в рабочей полости формы. Он зависит от условий литья и конструкции ЛС и может изменяться весьма значительно.

Для расчёта коэффициента расхода может использоваться выражение

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_{ст} + \sum \xi_{шл} \left( \frac{F_{ст}}{F_{шл}} \right)^2 + \sum \xi_{п} \left( \frac{F_{ст}}{F_{п}} \right)^2}} \quad (7)$$

где  $\sum \xi_{ст}$ ,  $\xi_{шл}$ ,  $\xi_{п}$  ~ сумма местных и линейных коэффициентов гидравлических сопротивлений соответственно стояка, шлакоуловителя и питателей. Однако на практике определение величины  $\mu$  по формуле, приведенной выше, затруднено из-за ограниченного количества справочных данных о гидравлических коэффициентах сопротивлений, а также из-за трудностей использования самих этих коэффициентов.

Поэтому при проведении практических расчетов целесообразно воспользоваться экспериментальными данными о значениях коэффициента  $\mu$  (рисунок 17).

Сопротивление системы	Типы литниковых систем								
	Верхние		Горизонтальные			Вертикальные		Вертикально-щелевые	Сифонные
	стояковые и щелевые	дождевые	верхнебоковые	среднебоковые	нижнебоковые	только с гл. стояком	с обратн. стояком		
1. Очень малое: нет поворотов	0,85	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Малое: два поворота	0,8	-	0,70	0,60	0,55	0,70	-	-	0,60
3. Среднее: три поворота	-	0,60	0,60	0,50	0,45	0,6	0,50	0,55	0,5
4. Большое: три поворота с фильтровальной сеткой керамической или металлической	-	-	0,5	0,45	0,40	-	-	0,4	0,35
5. Очень большое четыре поворота или три с фильтровальной сеткой из стеклоткани	-	-	0,4	0,35	0,3	-	-	0,3	0,25

ПРИМЕЧАНИЕ: Если песчаные формы не имеют выпоров или открытых прибылей, то коэффициенты расхода, приведенные в приложении, следует уменьшить на 0,10

Рисунок 17 – Зависимость  $\mu$  при открытых прибылях (выпорах)

При ламинарном движении отдельные слои жидкости скользят друг относительно друга, не смешиваясь между собой, а при турбулентном происходит интенсивное перемешивание расплава.

Режим движения жидкого металла зависит от скорости потока  $w$ , вязкости расплава, формы и размеров поперечного сечения канала. Связь между этими параметрами характеризуется критерием Рейнольдса

$$Re = 4WR_{\Gamma}/\nu, \quad (8)$$

где  $R_{\Gamma}$  - гидравлический радиус канала в рассматриваемом сечении, который в свою очередь определяется как  $R_{\Gamma} = F/P$ , где  $F$  и  $P$  -соответственно площадь сечения и периметр канала;  $\nu$  -коэффициент кинематической вязкости расплава.

Число Рейнольдса  $Re_{кр}$ , соответствующее границе перехода ламинарного режима в турбулентный, называется критическим. Тогда критическая скорость  $W_{кр}$  движения потока, разделяющая эти два режима может быть найдена из выражения  $W_{кр} = Re_{кр} \nu / 4R_{\Gamma}$ .

Развитие турбулентности ведёт к интенсивному перемешиванию движущейся жидкости и возникновению в итоге вихрей и пены, что обуславливает попадание шлаковых и других неметаллических частиц в питатели, а далее и в рабочую полость формы. Это является причиной загрязнения отливок и ухудшения их свойств.

На основе экспериментов с алюминиевыми сплавами установлено, что максимальные значения критерия Рейнольдса не должны превышать для стояка 10000, шлакоуловителя - 7000, питателей 1100 и рабочей полости формы - 280.

Наиболее сильные возмущения в расплаве возникают на участке перехода от стояка к шлакоуловителю, на поворотах и других сопротивлениях, когда резко меняется направление движения потока. Поэтому для сохранения ламинарности потока целесообразно снижать его скорость, а сочленения элементов ЛС, округления на поворотах каналов необходимо выполнять возможно более плавными.

#### *Расчет площадей и размеров элементов литниковой системы*

После того, как определены положение отливки в форме, разъем формы, конструкция ЛС, места подвода питателей, места установки и размеры прибылей следующим, весьма важным этапом, является выбор соотношения  $F_{ст}:F_{шл}:F_{п}$  определение величины расчётного напора и, наконец, расчёт площадей элементов типовой системы.

Из-за преимущества расширяющихся ЛС рекомендуем их не только при получении отливок из лёгких сплавов, но также чугуна и стали.

Материал отливки	$F_{ст}:F_{шл}:\Sigma F_{п}$
медный сплав	1:2:3 (1:2:2,2)
чугун	1:1,2:1,5
сталь	1:1,3:1,5 [1:1:(1...2)]
Примечание: в скобках приведены соотношения при использовании сифонного припаса (шамотных трубок)	

Рисунок 18 - Соотношение  $F_{ст}:F_{шл}:F_{п}$  для отливок из стали, меди, чугуна

**Определение величины расчётного напора  $H_p$**  производят после выбора мест подвода расплава и решения вопроса о том, будет ли заливка осуществлена через литниковую чашу или воронку и выбора типа разливочного ковша (поворотного или стопорного).

При заливке через чашу часть полости формы (рисунок 19, а), которая расположена ниже узкого сечения ЛС заполняется при постоянном напоре

$H_0$ , а другая часть, расположенная выше этого уровня - при переменном напоре, изменяющемся от  $H_0$  до  $H_0 - P$ . Поэтому величину  $H_p$  можно рассматривать как некоторый средний напор металла за время заливки и рассчитать его по формуле:

$$H_p = H_0 - P^2/(2C),$$

где  $H_0$  — начальный напор - расстояние от верхнего уровня металла в чаше до горизонтальной оси питателя;  $C$  - полная высота отливки без верхних прибылей;  $P$  — высота части отливки, находящейся выше горизонтальной оси питателей (практически выше плоскости разъёма формы).

Величина начального напора  $H_0$  легко определяется конструктивно, как сумма расстояний от плоскости разъёма до верхней точки отливки, толщины слоя формовочной смеси над отливкой и высоты надставной чаши, если она применяется.

При подводе питателей в самую нижнюю часть отливки (рисунок 19б) (горизонтальные нижнебоковые и сифонные системы)  $C = P$ . Следовательно  $H_p = H_0 - C/2$ . При горизонтальных верхнебоковых (рисунок 14в) или верхних ЛС,  $H_p = H_0$  ( $P = 0$ ).

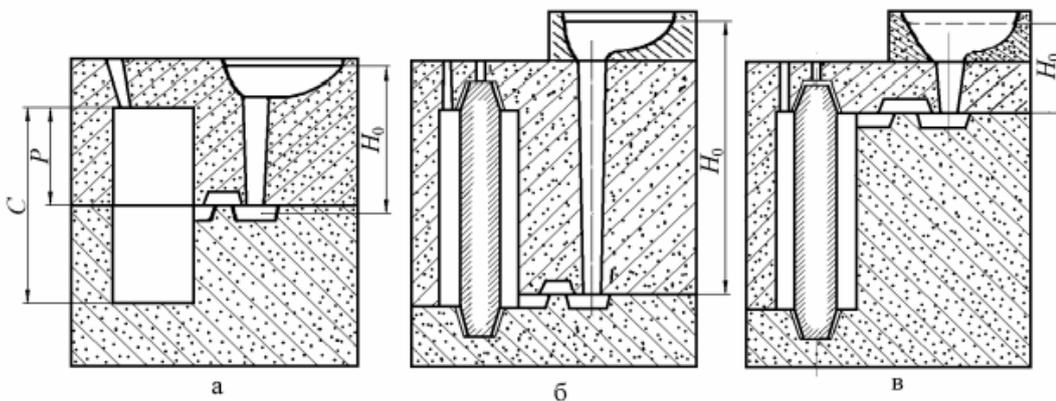


Рисунок 19 - Схемы к определению расчётного напора при заливке через литниковую чашу

При заливке металла из поворотного ковша, расплав поступает в воронку с высоты  $H_1$  (рисунок 14), что и учитывается в выражении для

$$H_p = \left( H_0 - \frac{P^2}{2C} \right) + H_1 \quad (9)$$

расчета

Найденные величины  $H_p$ ,  $\mu_p$ , а также известная из чертежа масса детали используются в качестве исходных данных при расчёте площадей каналов ЛС. При этом в первую очередь должна бы быть определена площадь самого узкого сечения ЛС, определяющего количество металла, поступающего в систему при заданном напоре. У расширяющихся ЛС наименьшим, естественно, является выходное сечение стояка, которое вычисляется по формуле

$$F_{ст} = \frac{M}{\rho_1 \tau_1 W_{ст}} \quad (10)$$

где  $M$  - масса всех отливок без верхних прибылей, заливаемых из одного стояка;  $\rho_1$ — плотность жидкого металла;  $\tau_1$ — время заполнения формы. Имея в виду, что

$$W_{ст} = \mu_p \sqrt{2gH_p} \quad \text{получаем:}$$

Часть данных ( $M$ ,  $\rho$ ,  $g$ ,  $\mu_p$ ,  $H_p$ ) являются справочными или их легко можно определить по чертежам отливки.

Что касается неизвестной величины  $\tau_1$  представляющей собой время подъема расплава в полости формы от момента выхода его из питателей до нижнего уровня последних, то для её определения предложены как теоретические выражения, полученные на основе анализа тепловых и гидродинамических условий течения металлов в каналах формы, так и достаточно простые эмпирические формулы. В частности, расчёт  $\tau_1$  может быть произведён, исходя из требования, что к концу заполнения формы температура расплава

должна быть выше температуры ликвидуса  $t_{лик}$  на 30...50 °С, т. е должно быть выполнено условие  $t_1 \geq t_{лик} + (30+50^\circ\text{C})$ . В соответствии с другим подходом регламентируется скорость движения металла в полости формы. С одной стороны её значение должно быть таким, чтобы заполнение формы было закончено раньше, чем головная часть движущегося расплава потеряет теплоту перегрева. Тогда, принимая как и ранее, что  $t_1 \geq t_{лик} + (30+50^\circ\text{C})$  получим

$$W \geq H_0 \left[ \frac{2b_\phi (t_{зал} - t_0)}{\sqrt{\pi} X \rho_1 c_1 (t_{зал} - t_1)} \right]^2 \quad (11)$$

С другой стороны скорость подъема расплава в форме не должна превышать критического значения  $W_{кр}$ , соответствующего границе перехода ламинарного режима течения жидкого металла в турбулентный. Следовательно, можно записать соотношение

$$\frac{Re_{кр} \cdot v}{4R_\Gamma} > W \geq H_0 \left[ \frac{2b_\phi (t_{зал} - t_0)}{\sqrt{\pi} X \rho_1 c_1 (t_{зал} - t_1)} \right]^2 \quad (12)$$

Здесь величины  $R_\Gamma$  (гидравлический радиус канала) и  $X$  равны.

Находим время заполнения формы:  $\tau_1 = H_0 / W$ .

Удовлетворительное согласование с опытными данными обеспечивают также эмпирические зависимости для расчета  $\tau_1$ . Так, например, на практике с этой целью часто используют известное выражение  $\tau_1 = K \sqrt[3]{\delta_{отл} M}$ , (13)

где  $K$ - коэффициент, учитывающий род сплава, тип литейной формы и конструкцию ЛС;  $\delta_{отл}$  - преобладающая толщина стенки отливки.

**Размеры стояка.** Наиболее технологичны круглые конические стояки, выходной диаметр которых можно найти по формуле:

$$d_{\text{ст}} = \sqrt{\frac{4F_{\text{ст}}}{\pi}} = 2\sqrt{\frac{F_{\text{ст}}}{\pi}} \quad (14)$$

Диаметр стояка сверху, в месте соединения с чашей или воронкой, определяют по формуле  $d_{\text{ст.в}} = d_{\text{ст}} + 0,01H_{\text{отл}}$ , (15)

где  $H_{\text{отл}}$  - высота отливки.

Площадь шлакоуловителей  $F_{\text{шл}}$  определяют после нахождения  $F_{\text{ст}}$ , исходя из принятых между ними соотношений. Затем определяют ширину шлакоуловителя у основания  $b_{\text{шл}}$  и сверху  $b_{\text{шл.в}}$  также высоту  $h_{\text{шл}}$ , для чего можно воспользоваться табличными данными.

$$b_{\text{шл}} = \sqrt{\frac{F_{\text{шл}}}{1,25}};$$

$$b_{\text{шл.в}} = 0,8b_{\text{шл}};$$

$$h_{\text{шл}} = 1,4b_{\text{шл}}.$$

Суммарную площадь питателя  $F_{\text{п}}$  (или питателей) определяют исходя из принятого соотношения  $F_{\text{ст}}:F_{\text{шл}}:F_{\text{п}}$ . Если применяют  $n$  питателей, то каждый их них имеет площадь  $f_{\text{п}}=F_{\text{п}}/n$ .

Толщину питателя для отливок из лёгких сплавов можно определить исходя из условия предотвращения попадания шлака через них в форму.

$$\delta_{\text{п}} < h_{\text{шл}}/3,25.$$

Ширина питателя  $b_{\text{п}}$  (или сумма  $b_{\text{п}}$ ) определяется из выражения

$$\Sigma b_{\text{п}} = F_{\text{п}}/\delta_{\text{п}} = \Sigma f_{\text{п}} / \delta_{\text{п}}$$

Для расчёта длины питателя  $l_{\text{п}}$  т. е. расстояния от шлакоуловителя до отливки, воспользуемся соотношением  $l_{\text{п}} = (0,5 \dots 0,8) h_{\text{шл}}$ .

Далее производим расчет в САЕ-системе – ProCast.

В качестве примера рассмотрим моделирование в САЕ-программе еще одной детали мини ГТД – рабочего колеса турбины. На основании конструкторской и технологической документации в программном комплексе NX 8.5 была построена математическая модель моноколеса турбины (рисунок 20).

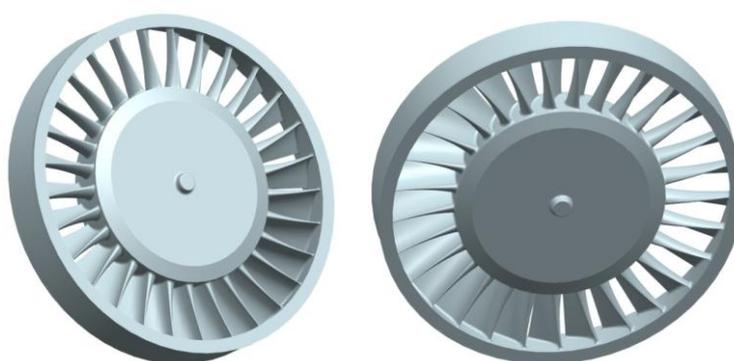


Рисунок 20 – САД модель моноколеса турбины

На следующем этапе необходимо подобрать и рассчитать конструкцию и вид литниково-питающей системы. Следует отметить, что данная деталь изготавливается методом литья по выплавляемым моделям.

Таблица 3 – Типы ЛПС

Тип	Питающий элемент	Характеристика прибыли
I	Центральный стояк	Коллективная
II	Горизонтальный коллектор	
III	Вертикальный коллектор	
IV	Вертикальный коллектор, заполняемый снизу	

V	Боковая прибыль	Индивидуальная
VI	Верхняя прибыль	
VII	Местная прибыль и коллектор	
VIII	Система местных прибылей	Расчлененная

Учитывая приоритет процесса питания над процессом заполнения, за основу деления ЛПС взят вид того элемента, от которого непосредственно осуществляется питание отливки.

Для отливки моноколеса турбостартера ГТД выберем литниковую систему VI типа с верхней прибылью. Эта прибыль представляет собой массивный резервуар металла над главным тепловым узлом отливки, получаемой в одноместной форме (рисунок 21). При наличии в отливке вторичных узлов их питают от этой же прибыли через дополнительные отводы и шейки. Металл в прибыль заливают из ковша или непосредственно из тигля печи. Сосредоточение наиболее горячего расплава в верхней части прибыли приводит к созданию в форме наиболее благоприятного для питания отливки градиента температур. Отличаясь, вследствие этого, высокой питающей способностью, верхняя прибыль надежно обеспечивает получение плотного металла крупных высоконагруженных литых деталей.

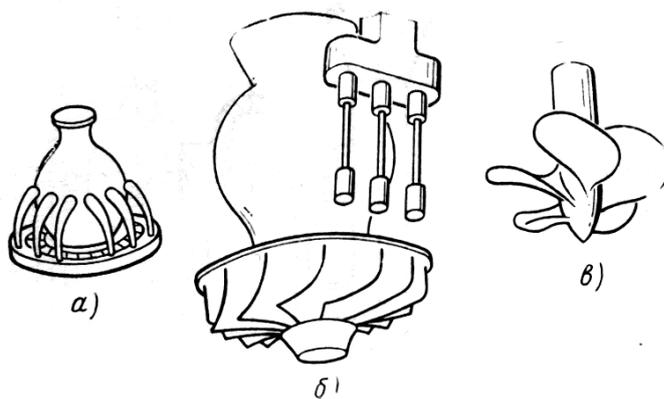


Рисунок 21 – Литниково-питающая система типа VI (верхняя прибыль). Примеры применения: а – ротор с бандажом; б – рабочее колесо газотурбинного наддува дизеля; в – гребной винт

На основании геометрии моноколеса, подберем и рассчитаем литниково-питающую систему (ЛПС) моноколеса турбостартера (рисунок 22).



Рисунок 22 – Математическая модель отливки с ЛПС

После создания математической модели детали создадим контактные, граничные и начальные условия в модуле PreCast. В закладке «**materials**» зададим материалы формы и заливки. В нашем случае задаем материал заливки никелевый сплав (Ni\_Inconel), а материал формы керамическое покрытие (Refractory\_Alumina). Так же необходимо задать вид контакта между материалом и формой, задание контакта производится в закладке

«**type**», в нашем случае «**casting**», в закладке «**empty**» ставим «**yes**» . В закладке «**Boundary Conditions**» в подменю «**Assign Surface**» задаем температуру, скорость, и температуру предварительного подогрева формы.

Используем закладку «**add**», где выбираем температуру (**temperature**), скорость (**velocity**) и предварительный подогрев (**heat**). При задании данных параметров в меню правого нижнего угла выбираем закладку «**add**», где задаем параметры (числовые значения) для каждого выбранного элемента условий заливки. При задании параметров предварительного подогрева формы следует выделить внешнюю оболочку формы, при помощи инструментов выделения узлов сетки, для упрощения выделения используем команды «**Propagate-Select**» и «**Define Propagating Angle**».

В окне задания параметров скорости необходимо задать скорость по оси заливки, по всем остальным осям значения необходимо оставить нулевыми. Если направление скорости заливки будет противоположно направлению вектора оси, то ставим перед значением скорости знак минус.

Затем задаем вектор гравитации, для чего открываем закладку «**process**» и подменю «**gravity**» в открывшемся окне задаем вектор гравитации ( $9,8 \text{ м/с}^2$ ) относительно оси заливки. Если ось заливки противоположно направлена относительно вектора гравитации, то ставим знак минус. Переходим на вкладку «**Initial Condition**» и выбираем параметр «**Constant**». Задаем начальные температуры отливки ( $T=1050^{\circ}\text{C}$ ) и формы ( $T=1570^{\circ}\text{C}$ ), для чего, выбрав, данный материал в нижней строке задаем значение температуры, используя клавишу «**enter**».

Переходим на вкладку «**Run Parameters**», в меню «**Preferences**» и из «**User Pre-defined Run Parameters**» задаем параметры процесса литья, в данном случае это литье по выплавляемым моделям - «**Gravity filling**»

На этом задание граничных и начальных условий заканчивается. Для сохранения и оптимизации введенных значений заходим во вкладку **File** и ставим галочку напротив пункта **Optimize**. Затем снова заходим во вкладку **File** и выбираем **Exit**. Происходит оптимизация модели с заданными условиями. На этом работа в модуле PreCast заканчивается.

Работа в модуле **DataCast** начинается с загрузки файла модели, подготовленного на этапе PreCast. Опция **Execute DataCAST** необходима для компиляции введенных в PreCAST параметров в файлы запуска расчета. Проводить компиляцию необходимо перед первым запуском каждого расчета, при повторном перезапуске (с текущего шага или нулевого) компиляция не нужна.

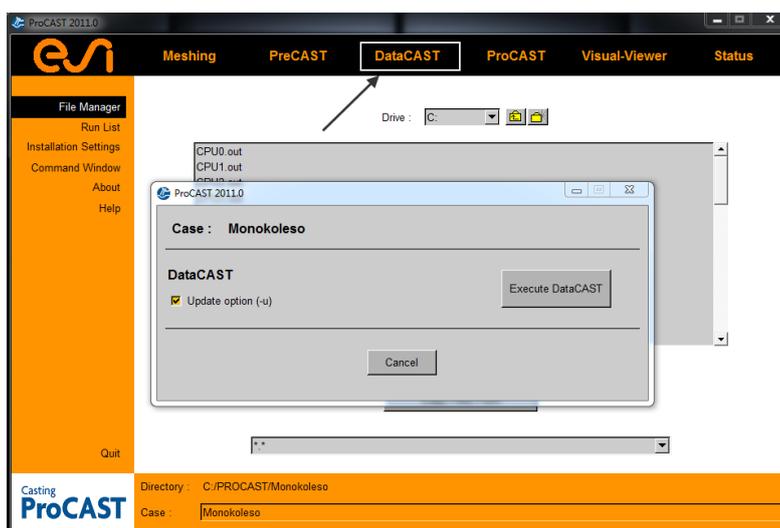


Рисунок 23 – Окно ProCast

Далее переходим в модуль ProCAST, который предназначен для управления решателем. Он создает все файлы, которые необходимы для ViewCast.

1. Перейдите в окно **File Manager**.
2. Найдите **\*d.dat** и **\*p.dat** файлы, которые будут использованы для расчета. Оба этих файла необходимы для решателя.

3. Нажмите кнопку ProCAST.
4. Появится новое окно.
5. Поставьте галочку в окне "**Execute DataCast first**". Эту опцию необходимо использовать перед каждым новым расчетом.
6. В окне «**Number of Processors**» указать количество используемых в моделировании процессоров. Данная функция доступна для подключения режима распараллеливания задачи. В нашем случае **Number of Processors=4**.

Нажмите кнопку **Run**, при этом будет запущен расчет. После этого появляется командное окно и произойдет обработка модели. Одновременно нажимаем кнопку **Status** в верхнем меню окна ProCAST и ждем пока закончится процесс обработки.

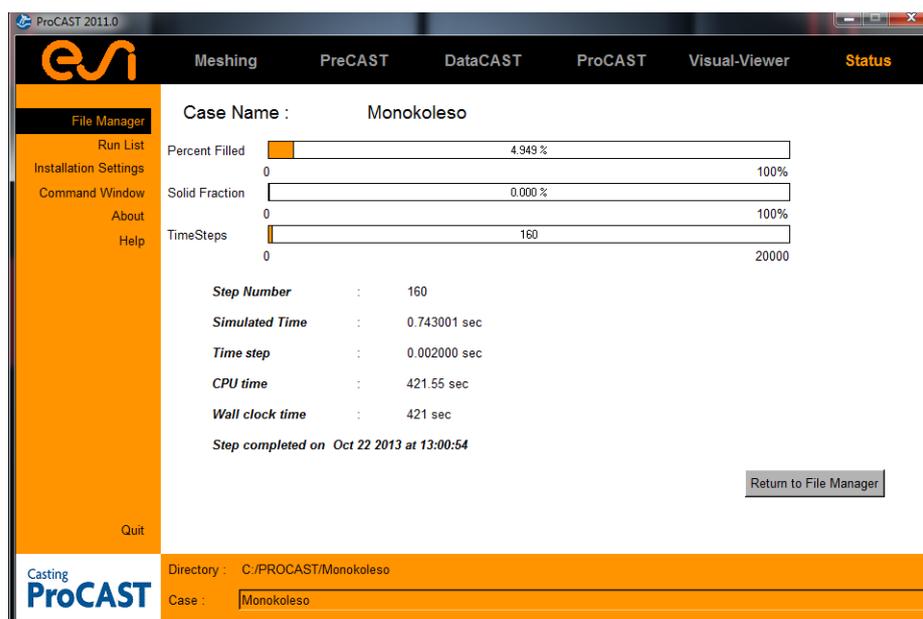
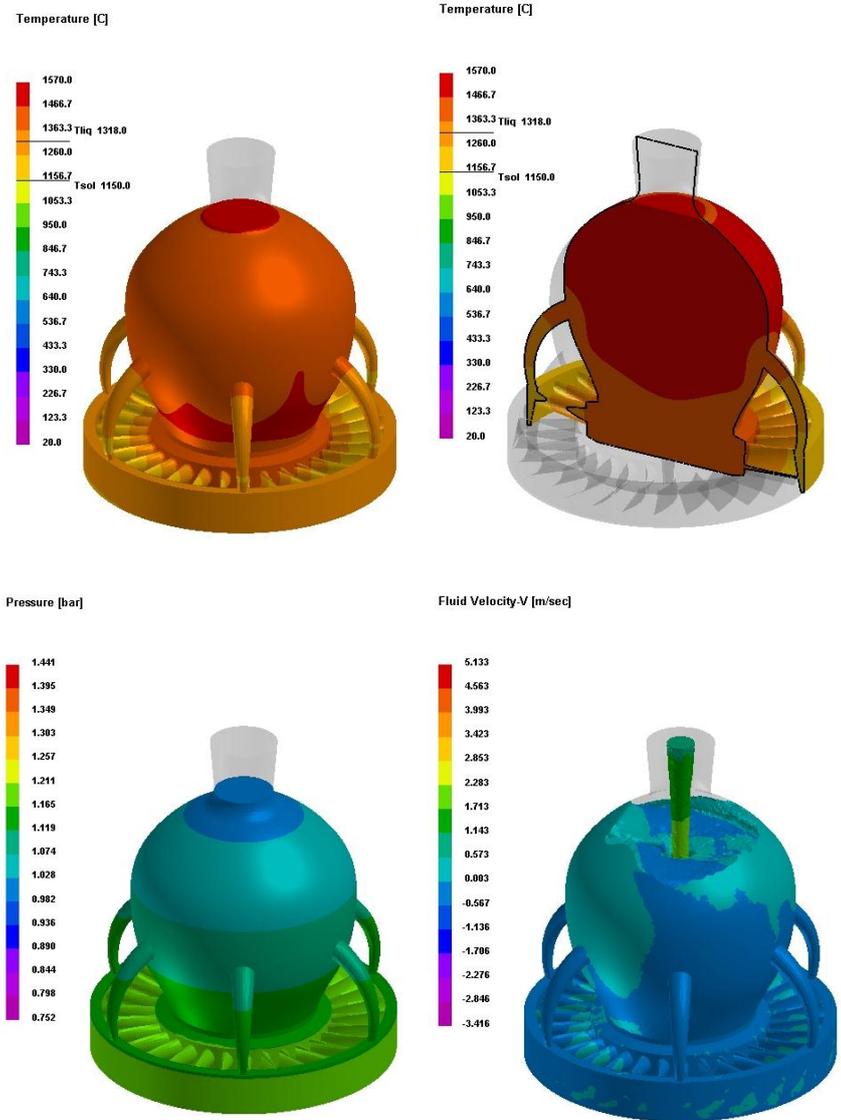


Рисунок 24 – Расчет задачи

Для просмотра результатов расчета программы ProCAST необходимо запустить дополнение **Visual-Viewer**, и открыть файл результата расчета с расширением .UNF.

Ниже приведены данные по результатам расчетов полей температур, скоростей, давлений жидкой фазы и прочее, на основании которых можно оценить качество проектируемого технологического процесса литья моноколеса турбины мини ГТД.



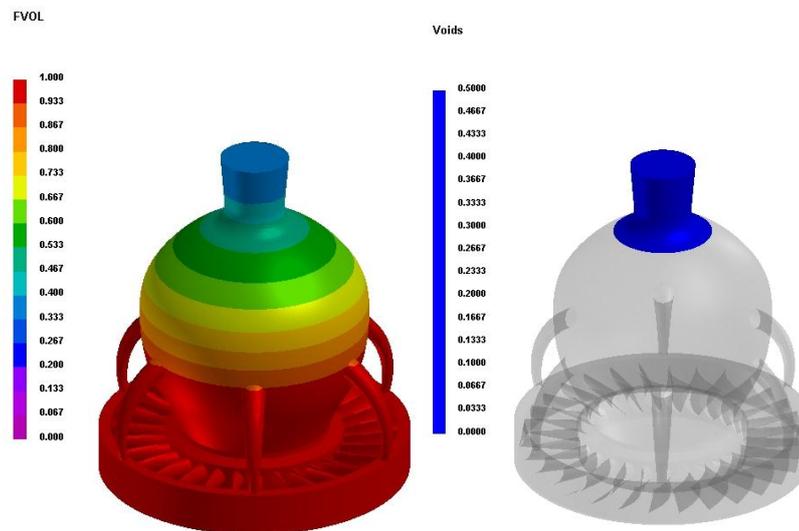


Рисунок 25- Результаты расчета

После моделирования процесса литья и утверждения конструкции литниково-питающих систем переходим к прототипированию. В качестве примера рассмотрим деталь «Крыльчатка».

## 2.4 Изготовление прототипа

Запатентованная технология PolyJet фирмы Objet (рисунок 26) работает по принципу послойного нанесения фотополимерных материалов на платформу с ультратонким слоем толщиной 16 мкм.

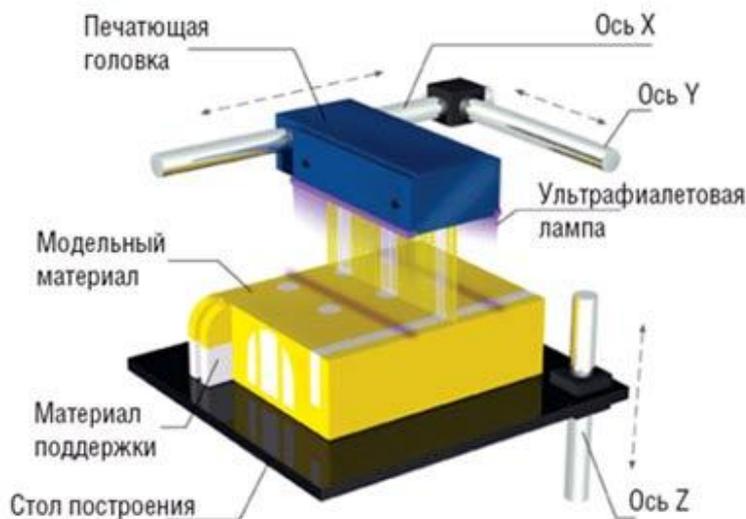


Рисунок 26 – Технология PolyJet

С помощью Objet Studio необходимо подготовить входные файлы для печати на 3D принтере Eden:

1. Разместить один или более объектов на лотке вывода.
2. Спозиционировать объект(ы) на лотке.
3. Сконфигурировать параметры объектов и лотка.
4. Сохранить конфигурацию лотка как *otf* (Objet Tray Format) файла.
5. Передать *otf файл* на 3D принтер Eden для печати.

Приложение Job Manager отображает очередь всех отправленных по сети клиентскими станциями на принтер Eden работ и их статус и позволяет редактировать и манипулировать всеми работами.

Ориентация моделей на лотке вывода влияет на скорость и эффективность их производства на 3D принтере, где и сколько будет использовано материала модели и будет ли поверхность модели глянцевая. Тем не менее, вам необходимо учесть разные факторы при решении как будет размещена модель на лотке, используя следующие правила размещения.

### ***X-Y-Z Правило***

Данное правило основывается на внешних размерах модели.

Т.к. печатные головки перемещаются вдоль оси X, время печати вдоль этой оси относительно невелико, по сравнению со временем печати вдоль оси Y и Оси Z. С этой точки зрения, рекомендуется для размещения объектов располагать их максимальным размером вдоль оси X.

Т.к. модели с высоким разрешением строятся вертикально, вдоль Оси Z слоями по 16-микрон, очень много времени занимает печать высоких

объектов. С этой точки зрения, рекомендуется для размещения объектов располагать их минимальным размером вдоль Z- оси.

Т.к. размер печатных головок составляет около 2 дюймов (5 сантиметров) по Y-axis, модели с размерами меньше указанного (по оси Y) печатаются за один проход. С этой точки зрения, рекомендуется для размещения объектов intermediate dimension вдоль оси Y.

### ***Tall-Left правило***

Это правило относится к моделям, одна из сторон которых выше, чем другая.

Т.к. печатные головки перемещаются вдоль X слева на право, часть, которая выше требует холостого прохода печатных головок начиная слева до достижения модели. Если, с другой стороны, высокая часть модели размещена слева лотка, печатным головкам требуется перемещаться только в границах модели - после того, как более низкая часть модели будет закончена. Таким образом, вам необходимо располагать более высокую часть модели, когда это возможно, слева. Следующие правила основываются на том факте, что материал поддержки не должен находиться сверху печатаемой модели.

### ***Recess-Up правило***

Данное правило касается моделей, содержащих не сплошные поверхности. Поверхности, имеющие пустоты, отверстия, и т.п. должны, по возможности, быть размещены лицом вверх.

### ***Fine-Surface правило***

Данное правило касается моделей, которые имеют одну сторону с мелкими деталями (такие, как лицевая сторона телефона с клавишами).

Сторона модели, содержащая мелкие детали должна, по возможности, быть размещена лицом вверх. В этом случае поверхность получится гладкой и ровной.

После расположения модели на лотке вывода, согласно рассмотренным правилам, следует вычислить необходимое количество материала поддержки и основного материала, а также времени печати. Для выращивания модели «Крыльчатка» управления на 3D печатающей системе Eden понадобится 210 грамм основного материала (FullCure 720) и 160 грамма (FullCure 705) материала поддержки, а время печати составит 8 часов 12 минут.

«Напечатанная» модель «Крыльчатка» представлена на рисунке 27.



Рисунок 27 - Изготовленная мастер-модель детали «Крыльчатки»

## **2.5 Изготовление силиконовой формы и восковой модели**

После получения мастер-модели по технологии литья в силиконовые формы необходимо получить восковую модель нашей детали. Для этого на прототипе «Крыльчатка», который используется в качестве мастер-модели, формируются следующие объекты: линия разъема, специальная система выпоров, точные глубокие отверстия и пазы. Суть процесса заключается в следующем: прототип будущего изделия помещается в специально изготовленную опалубку, затем контейнер наполняется силиконом и специальным отвердителем. Затем силикон проходит стадию очищения от газов. В результате полимеризации силикона в специальной установке

(рисунок 28) происходит его окончательное очищение от газов (вакуумирование в течение 20 минут) и получается необходимая силиконовая форма.

Силикон состоит из двух компонентов: основы и отвердителя, катализатора. Для получения необходимой массы необходимо смешать эти компоненты, при смешивании состав вбирает в себя много воздуха, именно для этого и проводят дегазацию, помещая смесь в вакуумную установку. Следует отметить, что заливать силикон необходимо тонкой струей так, чтобы смесь затапливала мастер-модель снизу. Это уменьшит образование пузырьков воздуха на поверхности мастер-модели.



Рисунок 28 - Система для вакуумного литья полимеров в эластичные формы МТТ С4/05

В качестве силикона использовали высокопрочную силиконовую двухкомпонентную резину *Пентэласт-720*. Для приготовления силиконовой смеси необходимо: взвесить 100 частей основы и 0,5 части отвердителя.

Таблица 4 - Характерные свойства Пентэласт-720

Характеристики	Показатель
Усредненная вязкость, при 20°C, СПз	>150000
Время жизни, при 23°C, мин	30-360
Твердость, ед. Шор А	30-50

Характеристики	Показатель
Сопротивление раздиру, кН/м, не менее	12
Прочность связи компаунда с металлом по подслою при отслаивании, кН/м, не менее	1,4
Относительное удлинение при разрыве, %, не менее	250
Условная прочность при разрыве, МПа, не менее	3,0
Удельное объемное сопротивление, при 20±5°C, Ом*см, не менее	3,0*10 <sup>14</sup>
Удельное поверхностное сопротивление, при 20±5°C, Ом, не менее	2,7*10 <sup>14</sup>
Тангенс угла диэлектрических потерь, при 10 Гц, не более	5,4*10 <sup>-3</sup>
Диэлектрическая проницаемость, при 10 <sup>6</sup> Гц, не более	5
Электрическая прочность, при 20±5°C, кВ/мм, не менее	12
Линейная усадка, %	1-1,5
Относительная плотность, при 25°C	1,8

Заполненная силиконовая форма переносится в специальную термическую камеру (40°C термошкаф) для полной полимеризации, где отвердевает полиуретан.

После полной полимеризации силиконовой формы разламываем контейнер и разрезаем силикон по линиям разъема.

В качестве восковой массы можно использовать литейный воск *Remet GTW* - предназначенный для производства мелких, средних и крупных по размеру моделей для аэрокосмической промышленности. Данный модельный состав обладает низкой вязкостью, что обуславливает отличную текучесть и эффективное извлечение из керамических оболочек.

К выплавляемым моделям предъявляется ряд требований: высокие механические характеристики, способность сохранять форму при длительном

хранении, малая шероховатость поверхностного слоя, обеспечение четкости воспроизведения (четкость контура), твердость. При этом модельные восковые составы должны быть:

- однородными;
- иметь минимальные усадку (при охлаждении) и расширение (при нагревании и выплавлении);
- достаточную жидкотекучесть в вязкоподвижном или пастообразном состоянии;
- температуру размягчения выше 40°C, плавления — 50-90°C;
- высокую теплопроводность;
- не прилипать и не взаимодействовать с эластичной и литейными формами;
- хорошо паяться;
- иметь плотность ниже 1000 кг/м<sup>3</sup>;
- быть экологически чистыми и безвредными как в исходном состоянии, так и при выплавлении (вытопке) и прокатке форм.

Таким образом, перед заливкой восковой массы в собранную силиконовую форму, последнюю необходимо поместить для прогрева в 80°C термошкаф на 1,5 - 2 часа. В это время в вакуумной камере растапливаем модельный воск.

По истечении 1,5 – 2 часов ставим прогретую форму в вакуумную машину, вставляем заливную трубку в заливную горловину формы. Вакуумируем 20 мин и заливаем воск в силиконовую форму.

Оставляем залитую форму до полного застывания воска. Затем снимаем скобы с линий разреза, разбираем силиконовую форму, аккуратно достаем полученную восковую деталь, см. рисунок 29.



Рисунок 29 – Восковая модель

## 2.6 Изготовление отливки

Крыльчатку изготавливаем из Al, поэтому применяем технологию литья в гипсовые формы.

Гипсовые формы выполняют безопочными. Чаще всего они состоят из двух половин — верхней и нижней. Отливку деталей производят следующим образом. На алюминиевую плиту устанавливают модели или гипсовые модельные плиты и алюминиевую опоку. Модельный комплект покрывают слоем разделительной смазки на основе стеарина и керосина. Готовят формовочную смесь и заливают ее в опоку. После затвердевания опоку снимают, переворачивают, развертывают отверстия под штыри, устанавливают стояк, выпор; смазывают эти детали разделительной смазкой, ставят верхнюю литейную опоку. Затем заливают гипсовую смесь, выдерживают форму до отверждения, разбирают форму и удаляют за специальные подъемы части модели. Отдельные, несложные по конфигурации отливки оформляют в одной половине формы, другой ее частью может служить холодильник или плита.

Литье изделий осуществляют двумя способами наливным и сливным. Наливной способ удобен для получения толстостенных или сплошных изделий и реже используется художниками, чем сливной. При сливном способе внутренняя поверхность формы придает изделию его внешние

очертания. Этот метод применяют в основном для получения тонкостенных изделий.

Гипсовые формы и стержни для отливки сложных тонкостенных деталей целесообразно обработать паром в течение 6—8 ч для увеличения податливости и после 14-часовой выдержки на воздухе высушить или прокалить в печи.

Добавка асбеста в гипс резко уменьшает количество трещин при высушивании и прокаливании формы. Гипсовый формовочный материал содержит огнеупорный кварцевый песок, шамотный порошок, маршаллит, армирующую добавку — асбест, связующее вещество — гипс. Особенностями гипсовых смесей является хорошая текучесть при добавлении в смесь воды, а также низкая теплопроводность по сравнению с известными формовочными материалами. Это позволяет медленно заполнять форму и создавать направленное затвердевание. Прочность гипсовой формы можно изменить введением различных добавок. В гипсовых формах получают отливки из цветных сплавов с температурой плавления не выше 1200°С. В отличие от цементного связующего, требующего для отверждения нескольких часов, гипс затвердевает за 5—15 мин.

Основная проблема литья в гипсовые формы - это не температурная стойкость, а низкая механическая прочность хорошо высушенной смеси. Проблемы проявляются в виде того, что при заливке алюминия происходит обрушение тонких выступающих частей полости и стояка. При этом фактически очень сложно получить отливку с четким рельефом. Решается это армированием формы асбестовыми волокнами.

Жидкую гипсовую массу для форм, в которые заливают алюминиевые сплавы готовят в смесителях пропеллерного типа. В воду предварительно вводят замедлитель схватывания (0,15-0,30% от массы сухой смеси).

Гипсовые формы для литья алюминиевых сплавов рекомендуется прокалывать при температуре до 600 °С в течение 3-12 ч. Готовая отливка изображена на рисунке 30.



Рисунок 30 – Отливка детали

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шкленник, Я. И. Литье по выплавляемым моделям [Текст]: учебник для вузов / Я. И. Шкленник, В. А. Озерова. — М.: Машиностроение, 1984.— 408 с.

2. Рыбальченко, Н.А. Проектирования литейных цехов [Текст]: учебник для вузов / Н.А. Рыбальченко. — Харьков, 1965.— 250 с.

3. Козлов, Л.Я. Производство стальных отливок: [Текст] учебник для вузов / Л.Я. Козлов, В.М. Колокольцев, К.Н. Вдовин и др./ Под ред. Л.Я. Козлова. — М.: МИСИС, 2003. — 352 с.