

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения

(наименование института полностью)

Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные
процессы»

(наименование кафедры)

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Проект технологии и оснастки для изготовления детали автомобиля
литьем из чугуна в CAD/CAE

Студент

М.А. Кузнецов

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

Е.Н. Почекуев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Консультанты

П.Н. Шенбергер

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель программы

канд. техн. наук., доцент Е.Н. Почекуев

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

д-р. техн. наук., профессор В.В. Ельцов

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

(личная подпись)

« _____ » _____ 20 _____ г.

Тольятти 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 Обзор и анализ методов проектирования технологических процессов и конструкции литейных форм для изделий из чугуна в массовом производстве	5
1.1 Классификация типов изделий автомобилестроения из чугуна, получаемых литьем в песчаные формы	5
1.2 Традиционные методы изготовления изделий из чугуна литьем в песчаные формы	8
1.3 Анализ программных продуктов разработки технологии и конструкции	18
1.4. Выводы	24
2 Разработка технологии литья в песчаные форму детали типа «Кронштейн крепления заднего тормоза»	26
2.1 Классификация отливок и назначение припусков на механическую обработку.	26
2.2 Разработка электронной модели и чертежа отливки	36
2.3. Описание технологии литья	38
2.3.1 Подготовка и состав шихты для плавления	38
2.3.2. Режим нагрева и технология заливки	39
2.3.3 Состав формовочной смеси	42
2.3.4 Конструкция литейной оснастки	45
2.4 Выводы	47
3 Моделирование процесса литья из чугуна детали «Суппорт»	48
3.1 Разработка электронной модели литниковой системы	48
3.2 Создание сетки конечных элементов	53
3.3 Задание начальных и граничных условий	56
3.4 Моделирование заполнения и кристаллизации	58
3.5 Анализ процесса литья по стадиям процесса	60
3.6 Разработка мероприятий по совершенствованию технологии	64
3.7 Выводы	70
4 Разработка и параметризация литейной формы для изготовления детали типа «Суппорт» из чугуна	71

4.1 Анализ алгоритмов конструирования чугунолитейной оснастки	71
4.2 Разработка электронной типовой сборки формы	75
4.3 Создание банка данных параметризованных типовых элементов формы	80
4.4 Описание процедуры ускоренного проектирования литевых форм в САПР	94
4.5 Выводы.....	96
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	97
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	98

ВВЕДЕНИЕ

Литье в песчано-глинистые формы дает возможность получать отливки различных размеров и конфигураций при малых сроках подготовки производства, поэтому до 80% отливок из чугуна получают литьем в песчано-глинистые формы. Низкая стоимость материалов литейных форм и большая производительность автоматических формовочных линий (от 240 форм в час (опочная формовка) и до 500 форм в час (безопочная формовка)), делает этот способ экономически целесообразным при массовом и серийном производстве.

При массовом производстве даже низкий уровень брака, влечет за собой большие потери для предприятия. Поэтому комплексная разработка технологии литья и проектирования оснастки является актуальной для массового производства.

Целью работы является создание методики проектирования оснастки на базе стандартных элементов оснастки, которая позволит повысить качество и скорость проектирования. В работе приведена разработка технологического процесса получения отливки и метод проектирования чугунолитейной оснастки. В диссертации проведен системный анализ существующих алгоритмов и баз данных типовых конструкций чугунолитейной оснастки. Для анализа качества проектирования оснастки применяется метод конечных элементов.

Техническая новизна в работе представлена разработкой типовой параметризованной модели литниковой системы для литья изделия «Кронштейн крепления заднего тормоза».

1 Обзор и анализ методов проектирования технологических процессов и конструкции литейных форм для изделий из чугуна в массовом производстве

1.1 Классификация типов изделий автомобилестроения из чугуна, получаемых литьем в песчаные формы

Литьем чугуна в песчаные формы можно получать отливки различных конфигураций размеров и форм. В автомобилестроении это основной способ получения заготовок из чугуна.

По массе отливки подразделяют на четыре группы: мелкие (максимальная масса 10 кг), средние (50 кг), крупные (500 кг) и тяжелые (свыше 500 кг) [5].

По степени сложности отливки разделяют на шесть различных групп [6].

Для первой группы отливок характерными особенностями являются: невысокие усиливающие ребра, фланцы, бурты, прямолинейные и гладкие поверхности образующие тело отливки. Простую форму так же имеют и внутренние поверхности отливки. (рисунок 1.1). К первой группе можно отнести следующие отливки: диски, муфты, рукоятки фланцы, крышки, маховики.

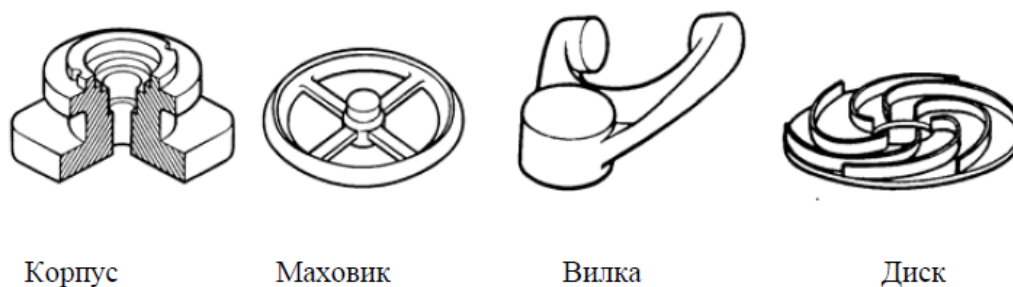


Рисунок 1.1 – Отливки первой группы сложности

Вторая группа отливок представлена изделиями, сочетающими в себе цилиндрические, плоские и криволинейные поверхности, с наличием

бобышек, ребер, приливов, отверстий и буртов. Поверхности образующие внутренние полости - простые. Полости характеризуются свободными выходами наружу и простой формой.

Группу представляют следующие отливки: вилки, простые корпуса, зубчатые колеса, маховики со спицами (рисунок 1.2).



Корпус

Маховик

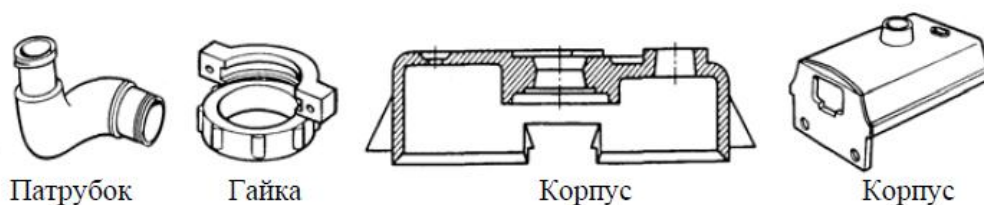
Вилка

Диск

Рисунок 1.2 – Отливки второй группы сложности

Третья группа отливок представлена изделиями имеющими цилиндрическую или коробчатую форму, которая сочетается с бобышками, фланцами и криволинейными поверхностями. Так же характерны отверстия и незначительные углубления. Для внутренних полостей отливки характерно наличие углублений и выступов с небольшими по высоте ребрами и бобышками. Полости имеют как правило свободный выход на поверхность детали, что исключает необходимость использования песчаных стержней.

Группа представлена следующими отливками: различные корпуса, соответствующие описанию группы, патрубки, шпиндели. (рисунок 1.3).



Патрубок

Гайка

Корпус

Корпус

Рисунок 1.3 – Отливки третьей группы сложности

Четвертая группа отливок представлена изделиями, имеющими преимущественно закрытую форму (реже частично открытую). Наружные

поверхности отливок имеют сложную криволинейную форму, с наличием углублений и выступов различной высоты. Сложная конфигурация отливок накладывает определенные ограничения на технический процесс. Из-за сложной формы внутренних полостей, необходимо использование песчаных стержней.

К этой группе принадлежат следующие отливки: траверсы, полости турбин, картеры сложной формы, корпуса редукторов, станины прессов. (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Отливки четвертой группы сложности

Пятая группа включает в себя отливки сложной цилиндрической или коробчатой формы, с ребрами, имеющими пересечения под различными углами, выступами и углублениями, различной глубины. Внутренние полости отливок имеют сложную, преимущественно закрытую форму и затрудненный выход на поверхность отливки.

Характерными отливками для данной группы выступают: корпуса воздуходувки, головки цилиндров, фундаментные рамы, крышки цилиндров крупных дизелей, станины металлорежущих станков (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Отливки пятой группы сложности

Шестая группа отливок представлена отливками, имеющими исключительно сложные формы, все отливки закрытого коробчатого или цилиндрического типа. Как и в отливках пятой группы имеют мест о пересечения наружных ребер, но в дополнение к ним, могут находится фланцы и кронштейны. Внутренние полости также, как и наружные имеют исключительно сложную форму, преимущественно с затрудненным выходом на поверхность отливки.

К данной группе принадлежат следующие отливки: детали воздуходувок, блоки цилиндров, блок-картеры, станины специальных металлорежущих станков, рабочие колеса гидротурбин, сложные корпуса (рисунок 1.6).

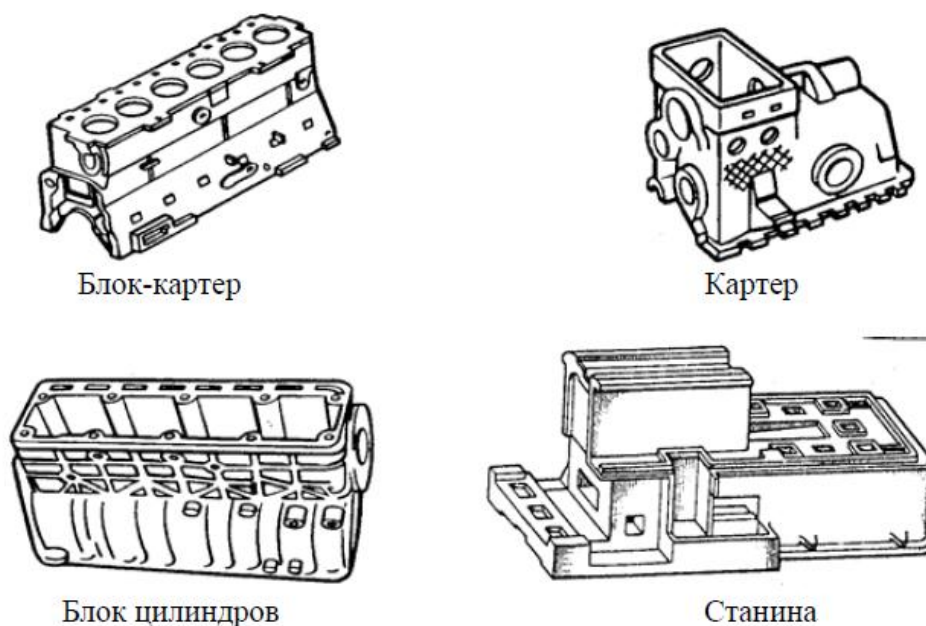


Рисунок 1.6 – Отливки шестой группы сложности

1.2 Традиционные методы изготовления изделий из чугуна литьем в песчаные формы

Литейное производство – один из самых рациональных и универсальных способов получения заготовок и деталей в различных

областях производства. Например, в машинах и промышленном оборудовании доля литых деталей около 50%, в автомобилях, примерно, 55% в металлорежущих станках – 80%. [1]

Способом литья можно получать заготовки и детали различных форм и габаритов. В зависимости от способа литья и процесса кристаллизации заготовка приобретает уникальные характеристики.

Технологическим процессом литья называют, получение из металлов и сплавов, путем заливки расплава в полость формы. Под технологическим процессом литья понимают способ получения заготовок путем заливки расплава в рабочую полость формы. В результате охлаждения и последующей кристаллизации формируется геометрия отливки, соответствующая геометрии полости формы, в которую подается расплав. Поднутрения и внутренние полости, которые невозможно выполнить оформить рабочей поверхностью формы, получают при помощи установки песчаных стержней в форму перед заливкой. После затвердевания и охлаждения отливку извлекают из формы, отделяют от литниковой системы и производят выбивку песчаных стержней. Затем отливку отправляют в дробеметную машину для окончательной зачистки поверхностей, после чего закаляют.

Отливки из чугуна в массовом производстве получают двумя основными способами литья: в кокиль и в песчано-глиняные формы[3].

Кокильное литье применяется при массовом и серийном производстве, возможно получение отливок различных конфигураций от простейших до особо сложных.

При литье металла в кокиль плотность отливок повышается за счет более быстрого процесса кристаллизации, а также основные механические свойства выше на 15-30% по сравнению с литьем в песчаные формы. Таким образом образуется более мелкозернистая структура повышающая плотность и пластичность металла отливок. При литье в кокиль точности изготовления отливок повышается, а, следовательно, снижаются припуски на

механическую обработку, за счет чего увеличивается выход годного металла до 75-95%. [4]

К недостаткам литья чугуна в кокиль относятся: повышенная трудоемкость изготовления оснастки; ограничения по сложности конструкции и толщины стенок; склонность отливок к трещинообразованию. [4]

Исходя из специфики способа, применение кокильного литья для получения чугунных отливок, имеет смысл для простых отливок, не имеющих тонких ребер, не требующих значительной механической обработки. Так как интенсивное охлаждение кокиля, накладывает ограничение на получение тонкостенных протяженных отливок. В чугунных же отливках данный фактор приводит к такому дефекту, как отбел. [3]

Литье чугуна в песчаные формы это один из самых распространенных способов литья, им получают около 80% всех отливок по массе. Он подходит как для массового и серийного, так и для мелкосерийного и единичного производства[4].

Основными достоинствами способа являются дешевизна производства и наименьшая продолжительность освоение производства в сравнении с другими способами литья.

При реализации литья в песчаные формы приходится сталкиваться со следующими проблемами: получение отливок с высокими требованиями к точности; требования организации больших площадей под производственную площадку; низкий процент выхода годного металла, менее 60%; проблема получения мелких отливок; сложность получения тонкостенных отливок[4]

Литье чугуна в песчаные формы является наиболее распространенным способом получения чугунных отливок. Он универсален как с экономической, так и с практической точки зрения и позволяет получать отливки любых конфигураций при любых типах производства.

Литейная песчаная форма, изготовленная на автоматической формовочной линии всегда состоит из двух полуформ - верха и низа. Плоскость, по которой проходит разделение - называется плоскостью разъема. Формы бывают с вертикальной и горизонтальной плоскостью разъема: вертикальная используется в безопочной формовке, когда форма образована исключительно массивом формовочной смеси; горизонтальная наиболее распространена и встречается в опочной формовке, когда формовочная смесь ограничена стенками ящика (опоки). Внутри формы находится рабочая полость, получаемая оттиском оснастки, модельной плиты низа и верха.

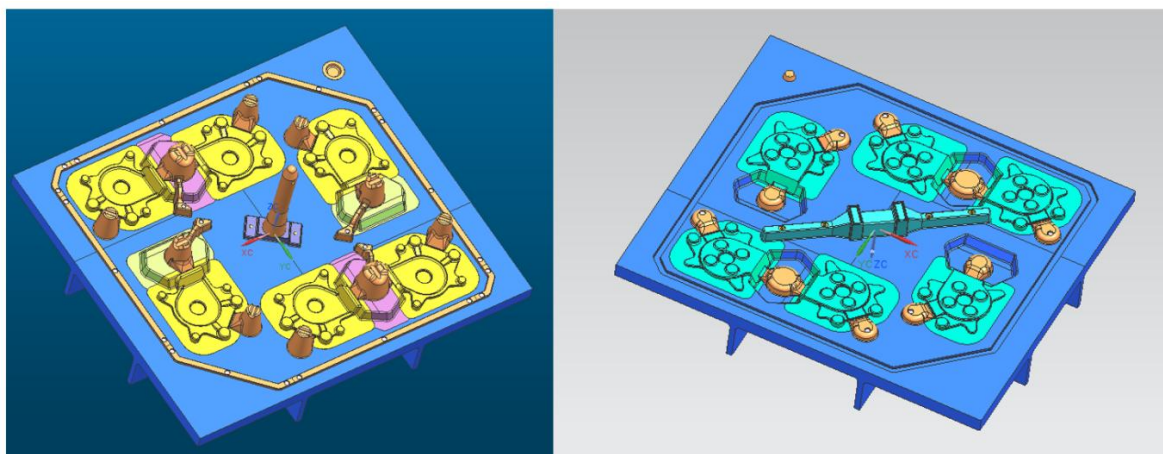


Рисунок 1.7 – Литейные формы верха и низа

В полученную полость подают расплавленный металл. Необходимость использования двух полуформ определяется, требованием к формуемости смеси и исключением поднутрений. Так же элементы литниковой системы располагаются на разных уровнях и просто не могут быть получены односторонней формовкой. [7]

Поднутрения и внутренние полости в отливках получают при помощи песчаных стержней. Песчаные стержни представляют из себя изделие повторяющие своей формой внутреннюю полость отливки. Их изготавливают из специальных стержневых смесей на основе песка. При массовом производстве стержни получают в стержневых машинах, где песок

под давлением надувается в горячую форму, после чего спекается, обретая требуемую форму. Спекание происходит за счет температуры и специальных химических добавок к смеси. Стержни так же являются разовым материалом и после затвердевания отливки выбиваются из нее. Для производства сложных отливок может требоваться до нескольких десятков стержней.

Для фиксации стержней в форме их оборудуют опорной частью, называемой знаком. Знак служит для установки и центрирования стержня в форме и не дает ему сместиться при подаче расплава в форму. Он является продолжением формообразующей части стержня, его размер зависит от габаритов самого стержня и условий его установки. Главным условием является фиксация стержня в форме. Знаки бывают горизонтальными и вертикальными, уклон на их гранях как правило составляет около 10-15 градусов, а между знаковыми частями стержня и формой всегда предусматривается установочный зазор равный 0,3-2 мм [7].

Когда расплав металла попадает в форму, начинается её интенсивный прогрев. Так как форма состоит из формовочной смеси, а так же, возможно наличие песчаных стержней, все составляющие этих элементов начинают выделять большое количество газов. Несмотря на то, что форма газопроницаема, этого недостаточно. Для дополнительного отвода газов создают систему наколов показанных на рисунке 1.8. Аналогичные наколы делают и в песчаных стержнях. При недостаточном отводе газов из формы, они запираются внутри полости заполняемой металлом, что приводит к появлению газовых раковин. [7]

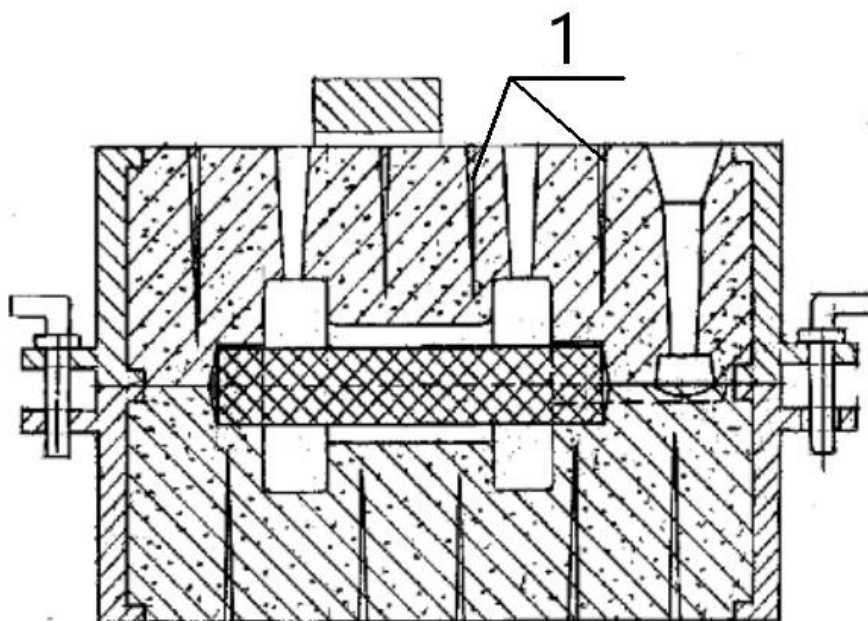


Рисунок 1.8 – Песчано-глинистая форма с вентиляционными каналами [7]

1 – Вентиляционный канал

Песчано-глинистые формы транспортируются и уплотняются в металлических рамках, называемых опоками. Опоки - это литые изделия получаемые из различных материалов, в зависимости от размеров и назначения они могут быть изготовлены из стали, алюминиевых сплавов, чугуна. Для отвода газов, в боковых стенках опок предусмотрены отверстия. Для лучшего удержания и уплотнения смеси, внутренние края опок снабжаются буртиками. Опоки больших размеров имеют ребра в основании, предотвращающие обсыпание смеси и играющие роль ребер жесткости, придающих опоке устойчивость к нагрузкам. Для центрирования и скрепления друг с другом опоки верха и низа имеют специальные приливы и «ушки» через которые они скрепляются между собой.

В одной литейной форме может располагаться до нескольких десятков отливок. При такой конфигурации главным условием является идентичный

подвод металла к каждой отливке, а так же заливка должна производиться через общую литниковую систему. Основные проходные сечения по ходу движения расплава рассчитываются (рисунок 1.9). [8]

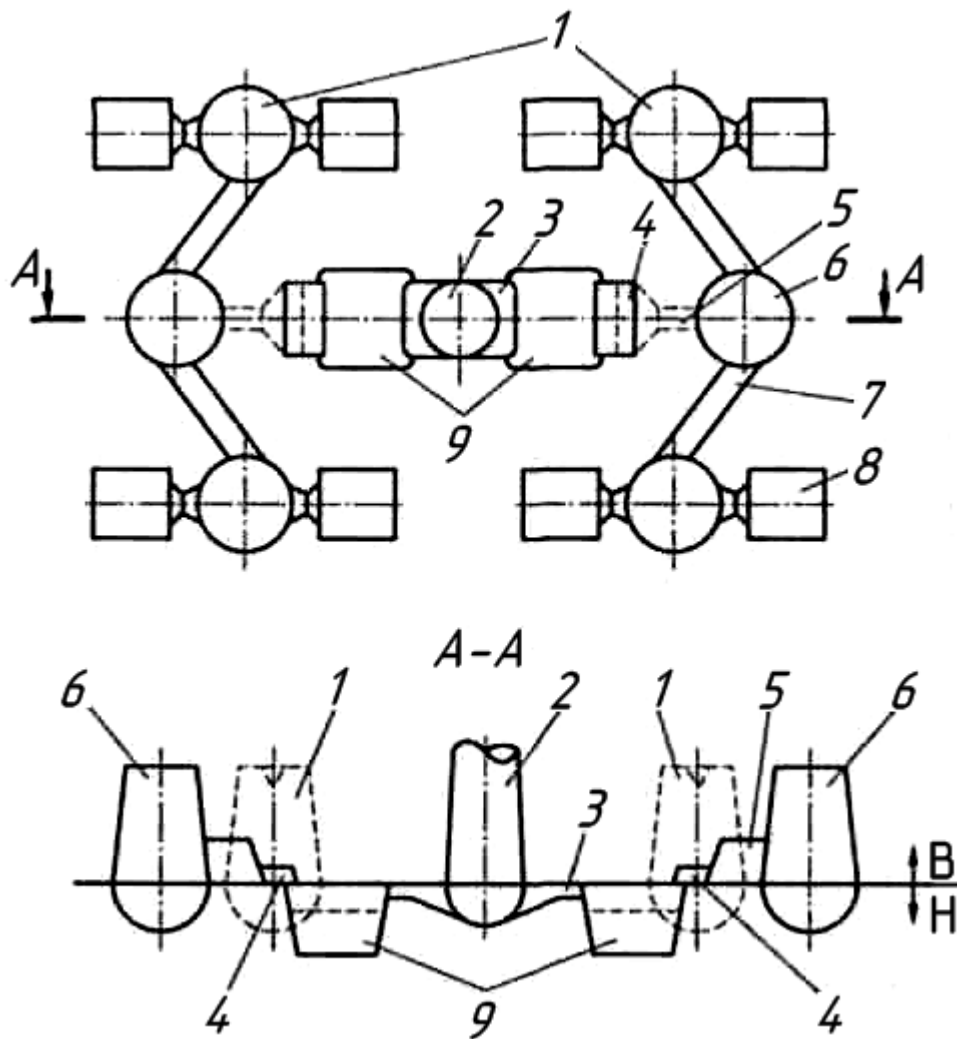


Рисунок 1.9 – Пример литниковой системы с несколькими отливками в опоке

1 – прибыли; 2 – стояк; 3 – литниковый канал; 4 – выход из литника; 5 – вход в шлакоуловитель; 6 – шлакоуловитель; 7 – выход из шлакоуловителя; 8 – отливка; 9 – реакционные камеры; Н, В – низ и верх формы [7]

Для правильной работы литниковой системы необходимо выдерживать определенные соотношения проходных сечений стояка, шлакоуловителя, питателей. В том случае если площадь поперечного сечения стояка больше поперечного сечения шлакоуловителя, а шлакоуловителя больше питателя,

литниковая система называется закрытой. Такое соотношение размеров проходных сечений литниковой системы создает условия, способствующие полному заполнению всех каналов расплавом. При таком устройстве системы – шлак и частички формовочной смеси, поступаая вместе с металлом, остаются в шлакоуловителе, не попадая в полость формы. При расчете закрытой литниковой системы исходят из следующего соотношения проходных сечений:

$$F_{\min} : F_{\text{ш}} : F_{\text{ст}} = 0,1 : 1,1 : 1,5 \quad (1.1)$$

, где:

F_{\min} – минимальное проходное сечение;

$F_{\text{ш}}$ – сечения шлакоуловителя;

$F_{\text{ст}}$ – сечения стояка.

Так же помимо закрытой литниковой системы, существуют открытая и комбинированная литниковые системы. Открытая литниковая применяется для легко окисляющихся сплавов (алюминий, сталь и др.), а также крупных отливок. Особенностью открытой системы является установка в нее специальных фильтров для шлакоотделения. Проходные сечения в такой системе, в отличие от закрытой, увеличиваются по ходу движения металла. Соотношения проходных сечений:

$$F_{\text{ст}} : F_{\text{ш}} : F_{\text{п}} = 1 : 1,1 : 1,25 \quad (1.2)$$

, где

$F_{\text{п}}$ – сечения литника.

После заливки и кристаллизации расплава, необходимо извлечь получившийся «куст» из формы. Форма попадает на специальные вибрационные решетки, благодаря действию вибрации смесь, составляющая тело формы, разрушается и просыпается сквозь решетку и по транспортной ленте отправляется обратно в смесеприготовительные установки. Помимо смеси из отливки так же частично удаляются песчаные стержни. После того как «куст» очищен, его транспортируют далее для финишной обработки.

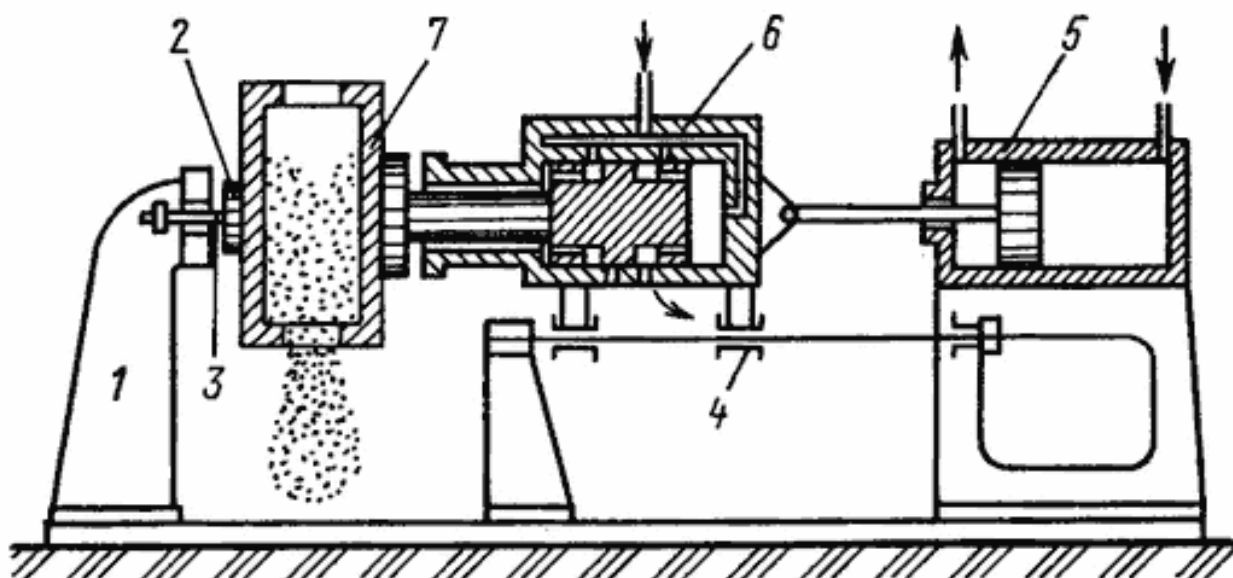
Под финишной обработкой понимают операции выбивки стержней, обрубки, зачистки заусенцев, острых кромок, термообработки, пробивки залитых отверстий, окраски, механической обработки, контроль и исправление дефектов.

Обрубка – операция отделения элементов литниковой системы от тела отливки. Для сталей и чугуновых сплавов применяют метод удаления литниковой системы при помощи молотков. Для пластичных сплавов чаще применяют газовые резаки, ленточные или дисковые пилы

Отделенные от литниковой системы отливки необходимо зачистить от пригоревшей смеси и мелких заусенцев, для этого их от в галтовочные барабаны. Так же отливки очищают методом дробеметной обработки. Помимо этого иногда применяют вибрационную очистку, дробеструйную или пескоструйную обработку.

После заливки могут возникать незначительные дефекты в виде проливов, заливов, заусенцев, которые устраняют на операции зачистки. На зачистку отливки поступают после обрубки, выбивки и дробеметной обработки. Зачистка производится на наждачных кругах.

При обработке простых мелких отливок, песчаные стержни удаляются из них, на этапе выбивки либо дробеметной обработке. Стержни из сложных мелких и средних по массе отливок удаляют на пневматических вибрационных машинах (рисунок 1.10). [9]



1 – упор, 2 – прижимная планка, 3 – пружина, 4 – направляющие, 5 – толкатель, 6 – вибратор, 7 – отливка

Рисунок 1.10 – Пневматический вибрационный станок для выбивки стержней [9]

Для улучшения физико-механических свойств отливки производят её закалку или термообработку. В зависимости от сплава из которого она отлита применяют различные виды термообработки. Для белого чугуна производят отжиг, с дальнейшим получением ковкого чугуна. Для отливок из стали так же применяют отжиг и нормализацию. Для отливок из алюминия и магниевых сплавов, так же, как и для стальных применяют отжиг.

При производстве заготовок неизбежно появления брака, который не влияет на эксплуатационные характеристики заготовки, однако является неприемлемым. Например, поверхностные усадочные раковины или небольшие трещины. Такие дефекты устраняют при помощи электродуговой или газовой сварки. Возможно применение металлизации, пайки и пропитки специальными составами

Одной из наиболее ответственных операций финишной обработки является контроль качества отливок. В зависимости от назначения, к отливкам выдвигаются различные требования и каждому требованию

соответствует особый метод контроля. Для разметки отливки и проверки её на соответствие чертежу и электронной модели, её разрезают и исследуют. Так же на срезах можно увидеть скрытые дефекты такие как, усадочные раковины и пористость. Неразрушающие методы исследования включают в себя рентгенография, ультразвук, метод проникающих жидкостей. Самым простым методом является первичный визуальный осмотр, позволяющий определить видимые дефекты и качество поверхности.

Для предохранения от коррозии поверхностей отливок, работающих в сложных условия (узлы шасси автомобиля; станины; блоки цилиндров) заготовки окрашивают либо грунтуют. Существует несколько методов окраски заготовок: распыление краски пневматическими пистолетами окунание (заготовку погружают в ванну с краской).

1.3 Анализ программных продуктов разработки технологии и конструкции

Программное обеспечение используется для создания электронных моделей и макетов изделий, оснастки и техпроцессов литья.

Для проектирования изделий и оснастки могут применяться различные САПР. К ним относятся прежде всего «крупные» системы САПР такие как CATIA и NX

CATIA - CAD/CAM/CAE – система для разработки изделий и оснастки для литья и его моделирования на разных этапах жизненного цикла. CATIA работает на основе ядра CNEXT, Которое содержит средства как для описания процессов так и для описания геометрии и её создания с возможностью сохранения, используемых при этом приемов и методов, в виде библиотек и баз данных корпоративных знаний.

Программный продукт CATIA предназначен для следующих отраслей промышленности:

- Машиностроительной
- Автомобильной

Электронной
Широкого потребления
Аэрокосмической
Строительства заводов
Судостроительной

CATIA V5 (рисунок 1.11) состоит из платформ, которые представляют собой разделы программных продуктов, использующие разные уровни функциональности и затрат для решения аналогичных задач. Все их существует три: P1, P2, и P3.

Платформа P1 - это набор средств и модулей CAD/CAM – системы, которая, является частью PLM среды , которая в свою очередь имеет возможность дополнения продуктами других платформ для повышения производительности. Такая платформа является относительно дешевым решение для малых и средних предприятий.

Платформа P2 - это более продвинутый вариант системы CAD/CAM/CAE, которая предоставляет возможность коллективной разработки изделий с применением всего спектра модулей.

Платформа P3 включает специализированные модули наивысшей производительности.

Так же CATIA имеет области применимости (домены), они включают в себя модули, позволяющие решать задачи, возникающие в процессе жизненного цикла изделия. Выделяют семь таких областей:

- Написание программ для станков с ЧПУ;
- Машиностроительное проектирование;
- Синтез изделий для промышленности;
- Разработка дизайна изделий;
- Организация управления обменом данными и проектированием.
- Проектирование различных коммуникаций и систем;
- Инженерный анализ;
- Преимущества и недостатки:

- + Модуль, позволяющий проводить кинематический анализ изделий и сборок;
- + Хорошо реализован модуль поверхностного моделирования;
- + Расширенный модуль работы с МКЭ;
- + Удобство совместного проектирования;
- + Продуманная система отображения я структуры сборки;
- + Хорошо реализован модуль работы с листовым металлом;
- Плохо реализован модуль черчения [11].



Рисунок 1.11 – Символика CATIA V5

NX 9.0 (рисунок 1.12) является флагманской CAD/CAM/CAE - системой. Программа использует ядро геометрического моделирования Parasolid.

CAD модуль – предназначена для разработки проектно-конструкторской документации, а именно: моделирование деталей, сборок, чертежей; анализ; оптимизации конструкции.

CAM модуль – набор приложений входящих в этот модуль дает возможность создания электронного макета изделия и его вхождений,

которые в последующем будут использоваться на различных стадиях процесса подготовки производства.

Функциональность приложений дает возможность автоматизировать процесс проектирования изделия, а гибкая система ассоциативности упростить внесение корректировок в изделия.

CAE модуль – это набор средств инженерного анализа основанных на пре и постпроцессинге подключаемый к интерфейсу расчетных решателей. Данные приложения построены на базе геометрического ядра Parasolid и используют платформу NX CAD. Все модели, загружаемые в этот модуль имеют ассоциативную связь с CAD модулем. При внесении изменений в геометрию это так же отразится в уже загруженных деталях. Такая система позволяет вести подготовку производства изделия без отслеживания последних изменений.

Преимуществом программного продукта NX является концепция ассоциативности, которая позволяет связать все параметры модели в различных модулях NX и управлять ими с CAD модуля, изменения будут проводится во всех модулях куда загружено изделие. Кроме того, с геометрическими объектами можно связать любую информацию, которая описывает данное изделие [12].



Рисунок 1.12 – Загрузочная страница NX9.0

К «средним» системам, которые нашли применение при разработке изделий и оснастки для литья относится КОМПАС-3D. Это – система трехмерного проектирования, объединяющая в себе твердотельного и поверхностного моделирования. Данный продукт использует свое собственное математическое ядро С3D и параметрические технологии. Программный продукт обеспечивает проектирование машиностроительных изделий любой сложности и в соответствии с самыми передовыми проектирования. Система обладает инструментами для проектирования сборок «сверху вниз», а также по классическому методу «снизу вверх».

КОМПАС-3D включает в себя:

- возможность создания как 2D так и 3D моделей;
- модуль поверхностного моделирования;
- возможность коллективной работы над проектами, которые включают в себя большое количество деталей;
- узкоспециализированные функции, например, для создания литейных форм (создание литейных уклонов, полостей по форме изделия и плоскостей разъема);
- автоматическое построение разверток в чертежах
- возможность создания библиотек стандартных и элементов, заданных пользователем;
- возможность экспорта файлов в различные CAD/CAM/CAE системы [13].

Проектирование литейной оснастки требует, в основном, работы с твердотельным моделированием. Последующая жизнь проекта связана с неоднократным введением правок и изменений, что накладывает требование ассоциативности для узлов и элементов. Таким образом NX9.0 - программный продукт отвечающий всем вышеперечисленным требованиям. Он имеет удобный САД модуль объединяющий в себе твердотельное и поверхностное моделирование, в отличие от CATIA V5, а так же систему ассоциативных связей, позволяющую ускорить проектирование.

Для компьютерного моделирования и оптимизации технологических процессов литья и кристаллизации и в настоящее время применяются следующие CAE программа LVMFlow, ProCAST, CastCAE, SOLIDCast. Различия этих программ заключаются в анализируемых видах литья, используемых операционных системах, численных методах, получаемых результат.

LVMFlow используется для большинства видов литейных процессов:

Литье в кокиль;

Литье под низким давлением;

Литье в землю;

Литье под высоким давлением;

Литье по выплавляемым моделям.

В программе представлен банк данных материалов форм и сплавов, с возможностью пополнения, что позволяет получить более точный результат для любых материалов.

Вычислительный процесс программы основан на МКО (методе контролируемого объема), который дает возможность рассчитать:

- температурные колебания формы и отливки;
- процесс заполнения формы металлом;
- поле жидкой фазы;
- потоки конвекции;
- скоростные поля;
- поля давлений,
- деформацию отливки и напряжения возникающие в ней;
- вероятность возникновения дефектов в отливке;
- эффективность работы фильтрующих элементов;
- разработать технологию ЛПД;
- требуемый объем прибылей;
- процесс распределения газов в форме во время заливки;
- вероятность захвата воздуха при заполнении формы;

- износ формы; [14]

Система ProCAST в отличие от LWMFlow основывается на методе конечных элементов. Этот метод позволяет точно описать геометрию отливки и формы расчетной модели а так же учет следующих процессов:

- металлургического
- теплового характера
- напряженно-деформированного
- кристаллизационного

По сравнению с LWMFlow, ProCAST, имеет большее количество моделируемых видов литья.

Система способна рассчитать такие теплофизические свойства сплава как: плотность; вязкость; кривая выделения твердой фазы; теплопроводность; энтальпия. А так же механические свойства сплава: коэффициент линейного расширения; модуль Юнга; коэффициент Пуассона; предел текучести [15].

В результате анализа доступных программных продуктов для моделирования процесса литья была выбрана программа LWMFlow. Она соответствует всем требованиям литейного производства имеет простой интерфейс, дает достоверные результаты моделирования и имеет широкие возможности.

Использование пакета LWMFlow позволяет снизить роль натурального эксперимента, изготавливать отливки более высокого качества и сложной конфигурации, что позволяет снизить затраты на подготовку производства.

1.4. Выводы

1) Установлены основные типы, формы и геометрия изделий, получаемых литьем из чугуна в песчаные формы.

2) Проведен анализ структуры литейной оснастки для литья чугуна в песчано-глинистые формы.

3) Выполнен обзор и обоснован выбор программного обеспечения для проектирования и моделирования литья в песчаные. Для проектирования оснастки используется NX9.0, для моделирования процесса литья LWMFlow.

4) Выявлены основные задачи магистерской диссертации:

- Разработка технологии литья в песчаную форму детали «Кронштейн крепления заднего тормоза»
- Моделирование процесса литья в песчаную форму детали «Кронштейн крепления заднего тормоза»
- Разработка параметрической электронной модели оснастки для литья
- Создание базы данных типовых элементов литейной оснастки

2 Разработка технологии литья в песчаные форму детали типа «Кронштейн крепления заднего тормоза»

2.1 Классификация отливок и назначение припусков на механическую обработку.

Для снижения затрат на освоение и запуск производства новых деталей, необходимо разработать оптимальный техпроцесс, оценить и оптимизировать затраты труда, энергии и ресурсов. Классификация отливки является основой разработки технологии.

Всю классификацию отливок можно провести по трем основным признакам:

- Конструктивная сложность
- Технологическая сложность
- Специальные условия

Каждый признак делится на факторы, а фактор на группы сложности. Всего существует 6 групп сложности, и для каждой из них определены классификационные критерии.

Первым признаком выступает конструктивная сложность отливки, она разделяется 5 факторов, каждый из которых в свою очередь разделен на шесть групп сложности (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Факторы оценки сложности

Факторы оценки конструктивной сложности изготовления отливки				
Сложность поверхности	Масса	Максимальный габаритный размер	Толщина стенок	Характеристика выступов и углублений

Для начала проводится анализ по сложности поверхности.

Основными параметрами выступают:

- Наличие в отливке внутренних полостей сложной формы, со свободным или закрытым выходом на поверхность.

- Наличие отверстий углублений и выступов;

- Наличие в отливке поверхностей имеющих сложную конфигурацию;

Группа сложности определяется по принципу: чем сложнее поверхность отливки и чем больше внутренних полостей, тем выше группа. (табл. 2.2).

Таблица 2.2 – Группа сложности отливки по сложности поверхности

1	2	3	4	5	6
Незначительные выступы и углубления	Внешние криволинейные поверхности и простые внутренние полости	То же, с наличием внутренних полостей криволинейной формы	Конфигурации закрытой формы	Закрытые формы со сложными полостями, наличие каналов	То же, с наличием тонких ребер

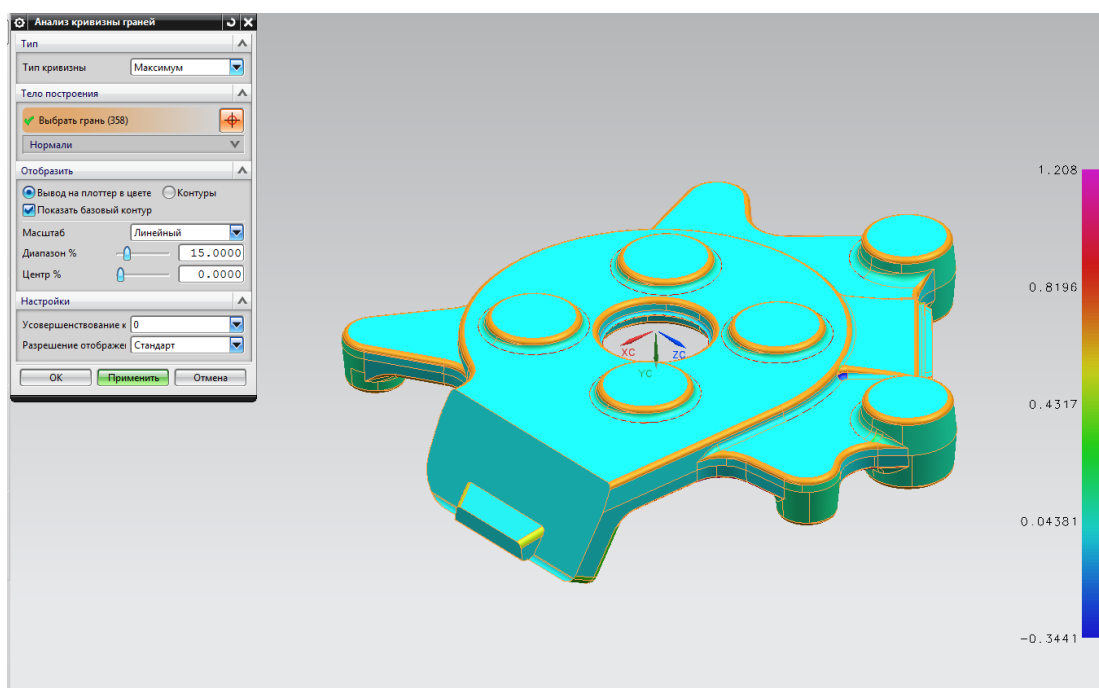


Рисунок 2.1 – Оценка сложности поверхности

Проведен анализ криволинейности поверхностей, из результатов которого следует, что деталь относится ко второй группе сложности по типу

поверхности, так как внешние поверхности имеют простую криволинейную форму.

Классификация по массе производится по принципу: чем выше масса (кг), тем сложнее отливка (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Группа сложности отливки по массе

1	2	3	4	5	6
<100	100-1000	1000-4000	4000-8000	8000-25000	>25000

Масса чугунных отливок, получаемых литьем в песчаные формы на АвтоВАЗе не превышает 100 кг, поэтому все они относятся к первой категории сложности по массе.

С учетом плотности высокопрочного чугуна ВЧ-50 7200 кг/м^3 , масса детали равна 1.2 кг (рисунок 2.2).

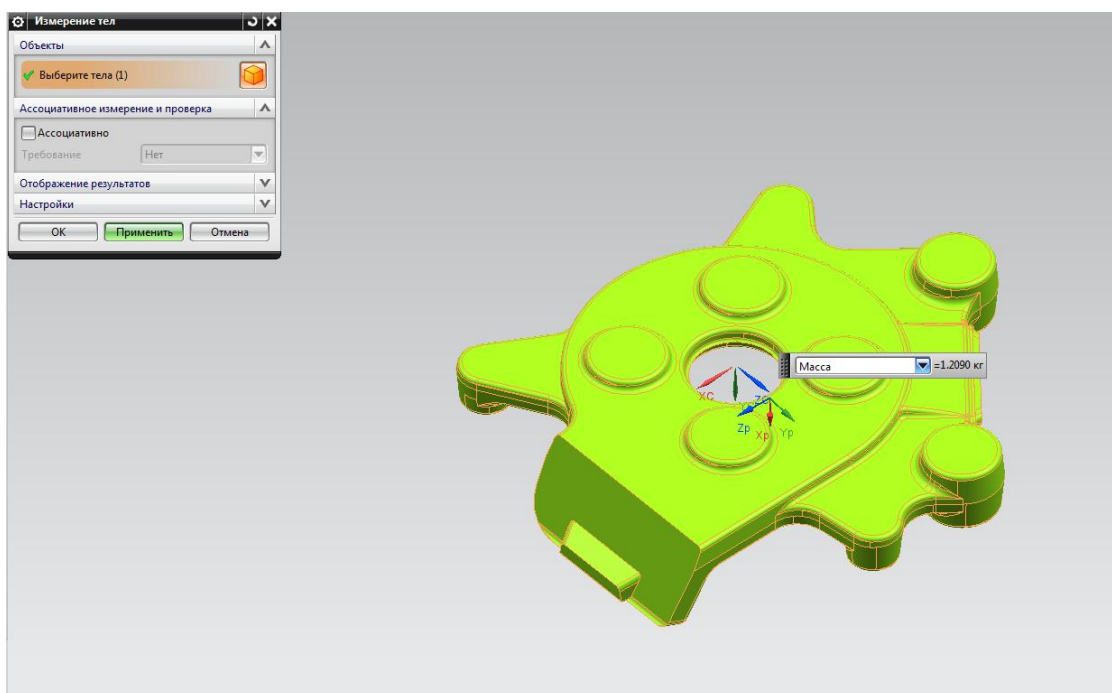


Рисунок 2.2 – Классификация в зависимости от массы отливки

При классификации отливки по габаритным размерам, действует тот же принцип, что и в классификации по массе: чем отливка больше, тем она сложнее (табл 2.4). В условиях АвтоВАЗа невозможно получать чугунные

отливки с максимальным размером более 720, так как размер опок 800x700. Все отливки имеют 1 группу сложности по габаритному размеру.

Таблица 2.4 – Группа сложности по максимальному габаритному размеру

1	2	3	4	5	6
<1000	1000-1600	1600-3000	3000-4000	4000-6000	>6000

При помощи функции «Размер заготовки» в приложении NX «проектирование пресс-форм» определены габаритные размеры заготовки, которые составили «159,6 x 158,2 x 48,3» (рисунок 2.3).

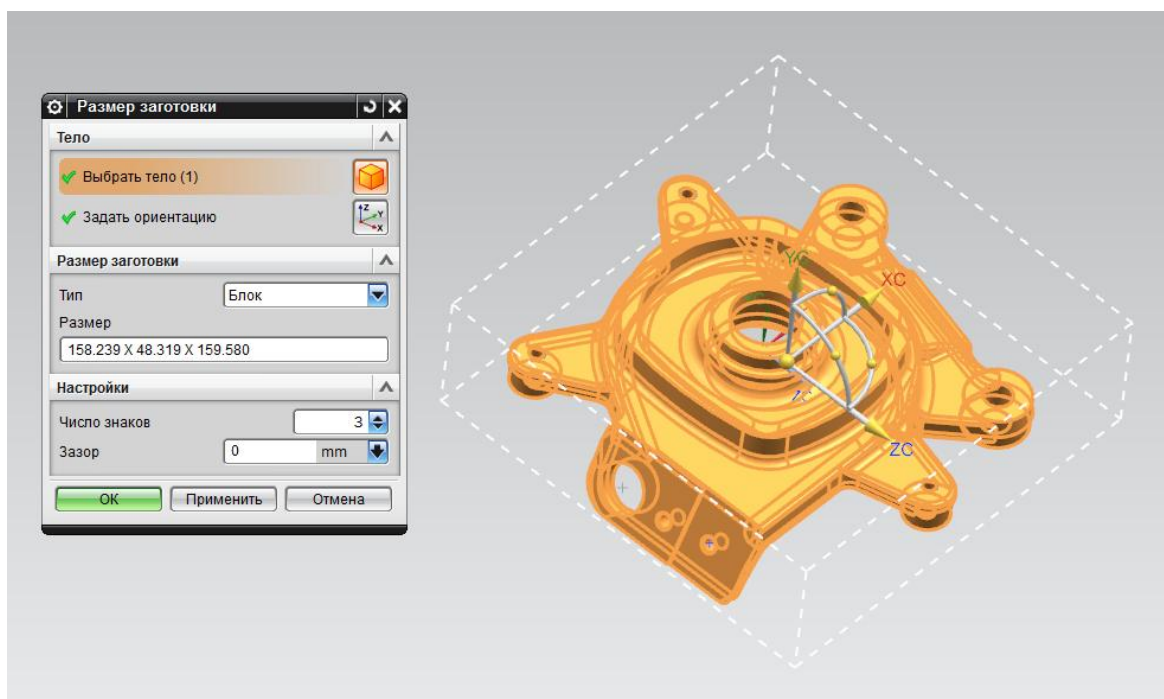


Рисунок 2.3 – Габариты отливки

При классификации по толщине стенки работает принцип: чем толще стенка, тем ниже группа сложности. (табл 2.5).

Таблица 2.5 – Группа сложности по толщине стенки

1	2	3	4	5	6
>30	30-25	24-19	18-13	12-7	<7

С помощью функции анализа NX «Проверка толщины стенок» определены максимальная и средняя толщины стенок (рисунок 2.4).

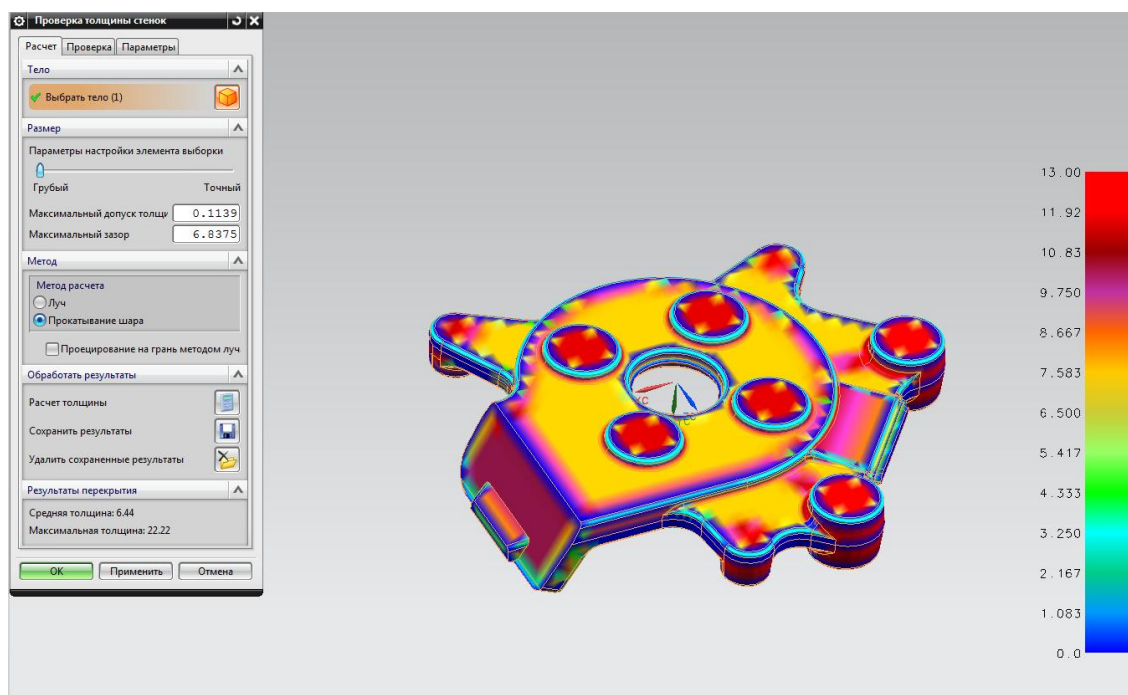


Рисунок 2.4 – Анализ толщины стенок

Средняя толщина стенок составила 6.44 мм, что относит деталь к 6 группе сложности по толщине стенок.

Затем производится анализ по сложности углублений (табл 2.6).

N – количество выступов углублений и ребер присутствующих в отливке;

h – высота углублений выступов и ребер.

Таблица 2.6 – Группа сложности по характеристике выступов и углублений

1	2	3	4	5	6
$h < 30$	$30 < h < 75$	$h > 75$	$h > 75$	$h > 75$	$h > 75$
$N < 5$	$N < 5$	$N < 5$	$N = 5 - 10$	$N = 11 - 15$	$N > 15$
	$h < 30$	$30 < h < 75$			
	$N > 5$	$N < 5$			

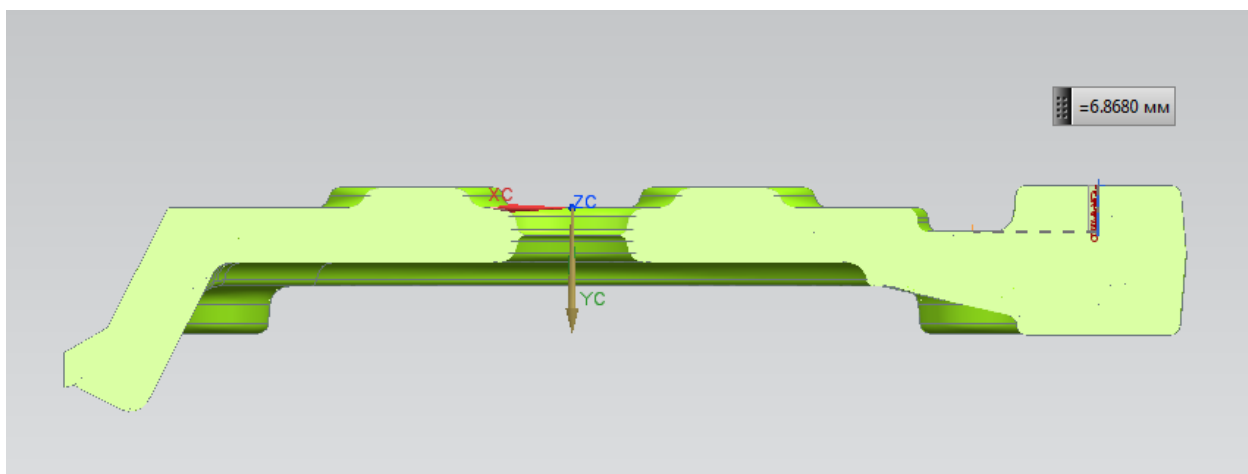


Рисунок 2.5 – Анализ углублений

Отливка не имеет большого количества углублений, а высота самого значительного из них равна 7 мм, следовательно, деталь относится к первой группе по сложности и характеристике выступов и углублений (рисунок 2.5).

Классификация отливок, получаемых литьем в песчаные формы по технологической сложности изготовления. Технологическая сложность включает в себя 4 фактора (табл 2.7).

Таблица 2.7 – Факторы оценки технологической сложности

Факторы оценки технологической сложности отливки			
Кол-во стержней или вкладышей	Виды механической обработки	Технические требования	Ответственность назначения

Анализ по количеству песчаных стержней, используемых в отливке, для создания внутренних полостей и поднутрений. (табл 2.8).

Таблица 2.8 – Сложность отливки по количеству песчаных стержней

1	2	3	4	5	6
до 1	2-5	6-12	13-20	21-30	>30

В отливке отсутствуют поднутрения, которые невозможно получить без помощи песчаных стержней. Количество стержней – 0, деталь относится к первой группе.

Сложность отливки варьируются в зависимости от объема её последующей механической обработки, количества сторон с которых отливка обрабатывается и чистоты получаемой поверхности. (табл. 2.9).

Таблица 2.9 – Сложность отливки по количеству и типу механической обработки

1	Без обработки или до 10% поверхности (сверление)
2	Одна – две стороны или от 10 до 15% поверхности; Rz-10-5; Ra-2.5-1.25
3	С трех сторон или от 15 до 20% поверхности; Rz-5-2.5; Ra-1.25-0.63
4	С четырех сторон или от 20 до 25% поверхности; Rz-2,5-0,63; Ra-0.63-0,16
5	С пяти сторон или 25-30% поверхности Ra-0,16-0,04.
6	С шести сторон или более 30% поверхности Ra<0,04

Группа сложности по механической обработке определяется по двум критериям: количеству сторон обработки и площади обработки, с учетом шероховатости поверхности. Проведен анализ по обоим критериям (рисунки 2.6 и 2.7).

- По площади обработки в процентах:

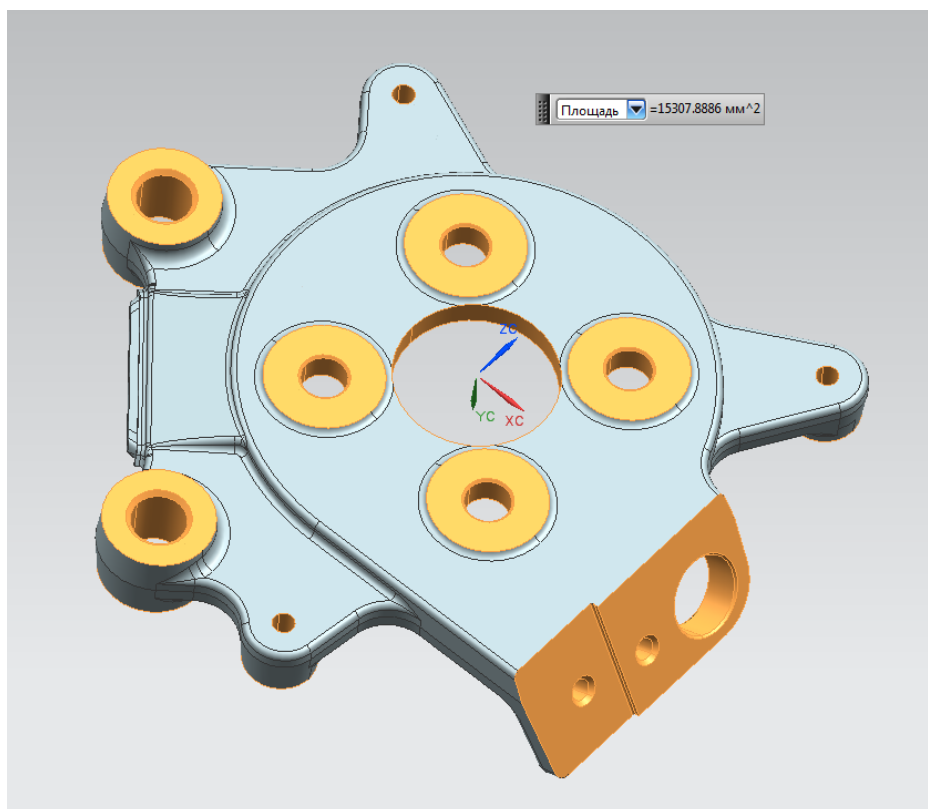


Рисунок 2.6 – Площадь обработки

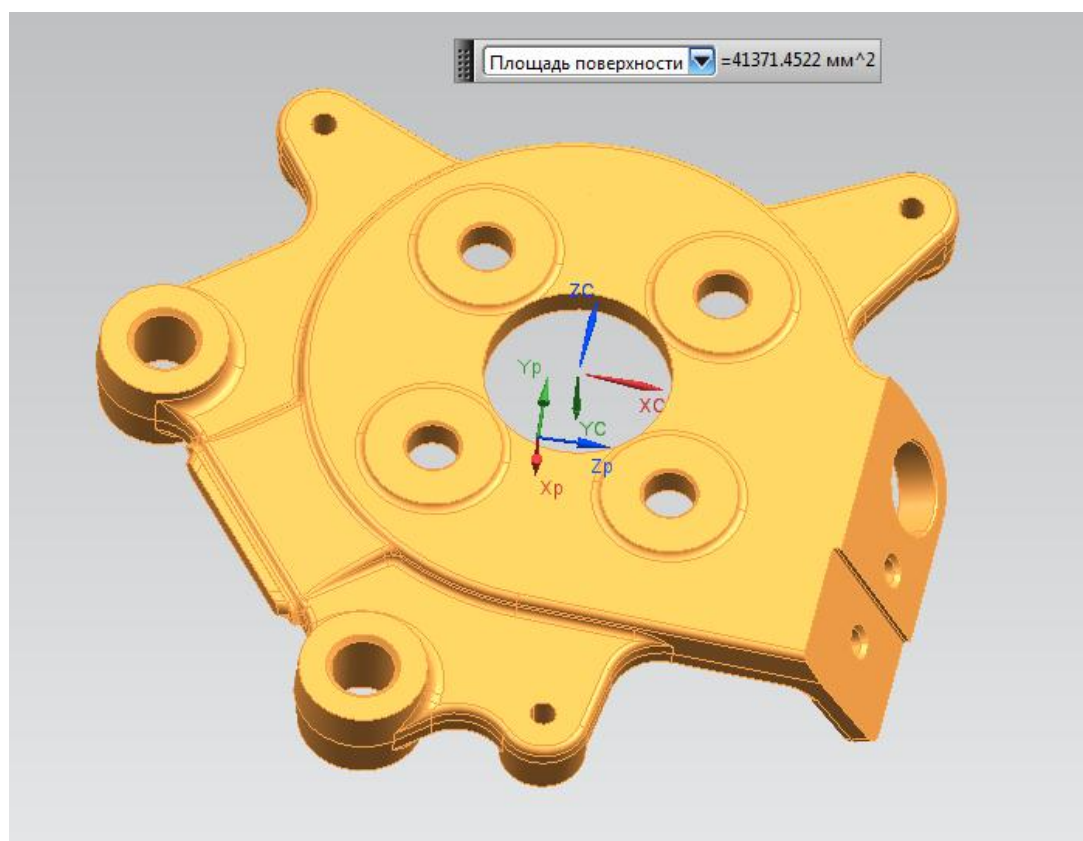


Рисунок 2.7 – Общая площадь поверхности

Общая площадь поверхностей 41 371 мм²

Площадь обработки 15 307 мм²

$$\frac{15307}{41371} * 100\% = 37\%$$

Площадь обработки соответствует группе сложности 6, однако, помимо площади учитывается и шероховатость поверхности. Кронштейн является узлом шасси, его поверхности не требуют высококлассной обработки, чистота поверхности не превышает Rz20. Поэтому следует обратиться ко второму критерию.

- По количеству сторон обработки:

Как видно из рисунков, заготовка обработана с трех сторон, а значит она относится к 3 группе сложности по механической обработке.

Одним из важнейших признаков классификации отливки является её группа сложности по ответственности назначения приведенная в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Сложность отливки по ответственности назначения

Группа сложности отливки					
1	2	3	4	5	6
Общего назначения		Ответственного назначения		Особо ответственного назначения	

Исследуемая деталь, получаемая из отливки, является узлом шасси, следовательно, рассчитывается на прочность и подвергается контролю на ударную вязкость, относительное удлинение, предел текучести. Деталь работает при постоянных динамических нагрузках и её разрушение может угрожать жизни людей. Проведя анализ требований к детали, следуют отнести её к 6 группе сложности.

В таблице 2.11 приведены физические, механические и гидравлические критерии, определяющие сложность отливки по ответственности её назначения.

Таблица 2.11 – Критерии, предъявляемые к отливке

Группа сложности	Признаки, определяющие сложность
6	Выдвигаются требования по химическому составу и физико-механическим свойствам. Особые требования к сплошности и однородности отливки. Требование непроницаемости отливки при давлении от 0,6 до 3,0 МПа
5	Выдвигаются требования по химическому составу и физико-механическим свойствам. Требование непроницаемости отливки при давлении от 0,6 до 3,0 МПа
4	Выдвигаются требования по физико-механическим свойствам. Требование непроницаемости отливки при рабочем давлении 0.6 МПа
3	Не предъявляются
2	
1	

Предъявляемые к отливки требования соответствуют 6-ой группе сложности по ответственности назначения.

Когда группы сложности отливки, по всем критериям определены, можно вывести приведенную группу сложности. Методика её определения довольно проста. В таблицу 2.12 заносится количество факторов принадлежащих каждой группе сложности и начиная с шестой группы в сторону первой переносятся значения из каждого столбца в предыдущий. И когда в одном из столбцов наберется количество факторов равное 5 или более та группа сложности будет являться приведенной.

Таблица 2.12 – Приведенная группа сложности отливки

Группа сложности	1	2	3	4	5	6
Число факторов, входящих в группу	4	1	1	-	-	3

Следуя методике расчета, три фактора из 6 шестой группы переносятся в третью, а из третьей уже 4 фактора во вторую. Таким образом во второй группе находится 5 факторов и приведенная группа сложности, согласно методике - вторая.

2.2 Разработка электронной модели и чертежа отливки

Заготовку кронштейна крепления заднего тормоза получают литьем чугуна ВЧ-50 в песчано-глинистые формы. К геометрии отливки предъявляются определенные требования:

- наличие литейных уклонов. Это необходимо для получения качественного отпечатка в формовочной смеси, при отсутствии уклонов смесь обсыпается.

- равномерная толщина стенок. В утолщениях возможно появление усадочных раковин

- Отливка не должна иметь острых углов или резких переходов от толстых стенок к тонким. Плавные скругления создают условия для более равномерного охлаждения отливки, уменьшают остаточные напряжения что в свою очередь предотвращает коробления и трещины.

Принимаем уклоны и радиусы внутренние - 3мм, наружные - 1.5. Литейные уклоны - 5° [6].

В конфигурации отливки присутствуют 12 отверстий, получаемых сверлением и центральное получаемое в литье, с последующей механической обработкой. Припуски на механическую обработку для наружных и внутренних поверхностей принимаем 1,5-2,5 мм. Припуски наносятся на поверхности контакта будущего изделия с другими деталями, отверстия с диаметром менее 30 мм удаляют, и в последующем получают сверлением. Так же на модель отливки наносятся геометрия подвода питателей

Чертеж отливки составляется в соответствии с ЕСТД ГОСТ 3.1125-88. Математическая модель отливки и чертеж отливки выполнены в системе автоматизированного проектирования NX9.0, на основе детали «кронштейн крепления заднего тормоза» (рисунки 2.8 и 2.9)

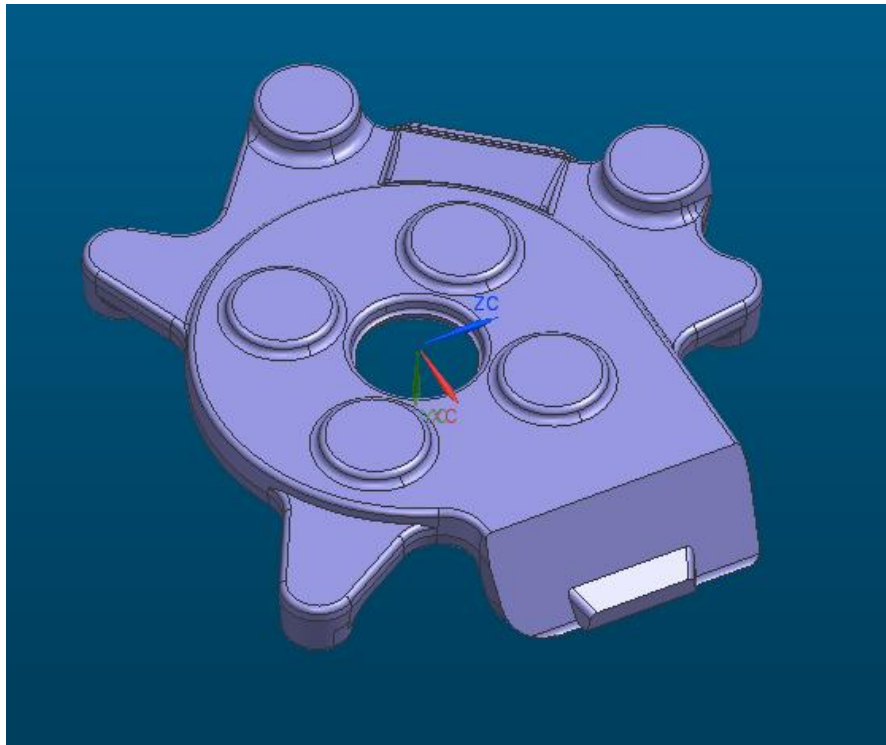


Рисунок 2.8 – Модель отливки

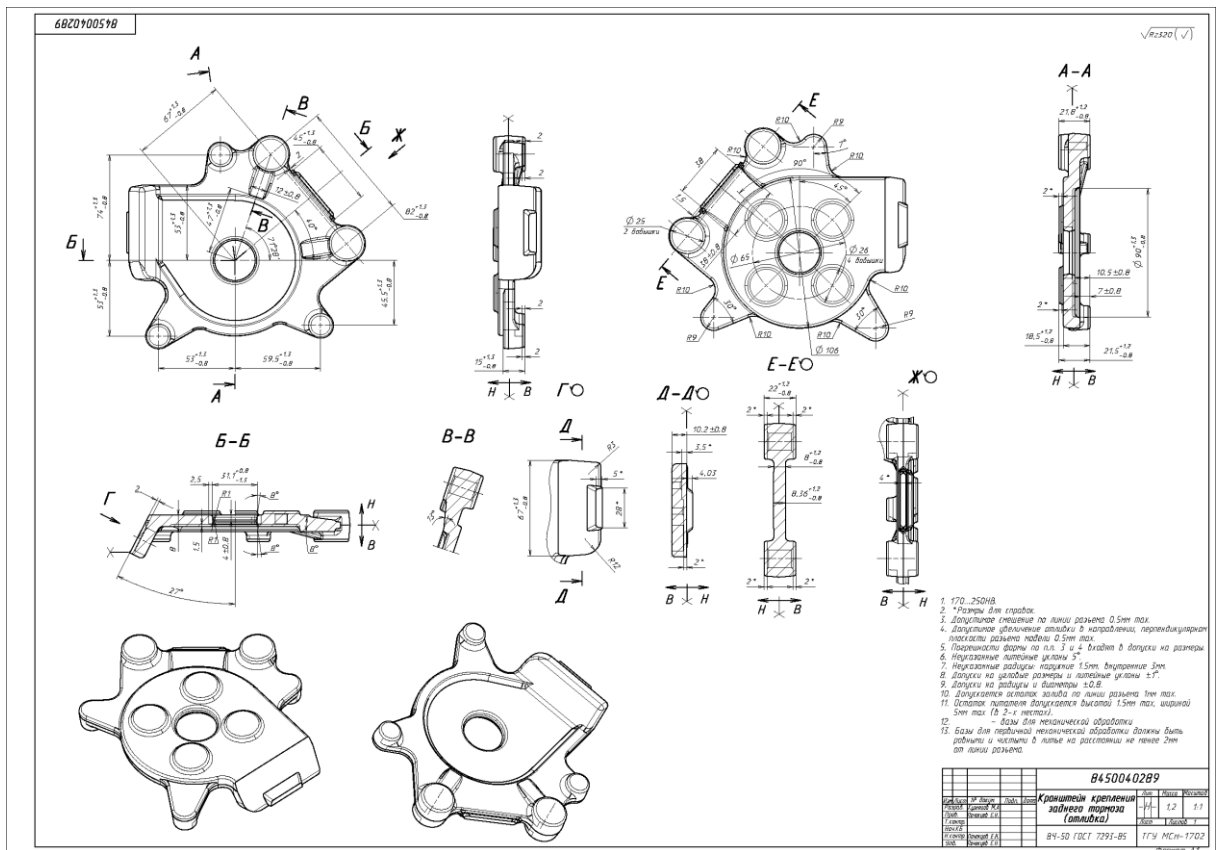


Рисунок 2.9 – Чертеж изделия

2.3. Описание технологии литья

2.3.1 Подготовка и состав шихты для плавления

Шихтой называется набор исходных материалов в определенном расчетом соотношении, подготовленных для переплава и загружаемых в плавильный агрегат на желоб, в ковш или в форму с целью получения сплава требуемого химического состава и физико-механических свойств.

В состав входят следующие шихтовые материалы:

При производстве чугунного литья – доменные чушковые чугуны, вторичные черные металлы, ферросплавы, лигатуры, модификаторы, раскислители.

К неметаллической части шихты относятся: флюсующие (шлакообразующие), неметаллические раскислители, карбюризаторы, кокс.

Так же в производстве используется возврат литейного производства: литники, прибыли, бракованные отливки, сливы, скрап, металл, собранный при сепарации шлака и формовочных смесей.

Для производства отливки используется материал ВЧ-50.

Высокопрочные чугуны характеризуются наличием шаровидного графита, образующегося в структуре отливки во время кристаллизации. Преимущество шаровидного графита перед пластинчатым, заключается в меньшем ослаблении структуры металла, а следовательно, происходит меньше концентрации напряжений. Для получения шаровидной структуры графита, расплав модифицируют. В него добавляют магний в различном виде, в процентом соотношении 0,03 - 0,07 от общего объема расплава. Так же возможно введение магниевых лигатур с ферросилицием и никелем в диапазоне 8 - 10%.

Таким образом в процессе кристаллизации график принимает шаровидную форму вместо пластинчатой. Высокопрочные чугуны обладают свойствами литых углеродистых сталей сохраняя при этом преимущества

чугуна, такие как хорошая обрабатываемость, высокая износостойкость, высокие литейные качества.

Для раскрытия полных возможностей высокопрочного чугуна, его подвергают полному циклу термической обработки. После закалки повышаются механические свойства отливки, а так же она избавляется от внутренних напряжений. Химический состав высокопрочного чугуна (ВЧ-50) представлен в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Химический состав ВЧ-50 согласно ГОСТ 7293-85

Углерод (C)	Кремний (Si)	Марганец (Mn)	Хром (Cr)	Фосфор (P)	Сера (S)	Железо (Fe)
3,20-3,70%	1,90-2,90%	0,30-0,70%	0,15%	0,10%	0,02%	основа

2.3.2. Режим нагрева и технология заливки

Загрузка шихтозавалки производится с помощью постовых кранов и загрузных бадей. Бадья устанавливается в зоне работы весовых электронных устройств. Затем проводится заполнение загрузочной бадьи шихтовыми материалами с помощью мостового крана с электромагнитной шайбой.

Заполненную шихтой бадью перемещают в плавильное отделение после чего загружают в плавильную печь. После расплавления шихты необходимо замерить температуру жидкого металла при выключенной печи. Измерение температуры проводят при помощи термопары, погружая ее в расплав чугуна на глубину 100-200мм. При достижении температуры в печи 1450-1500 С° отбирают печную пробу и направляют в лабораторию для химического анализа состава.

По результатам анализа, проводят корректировку химического состава руководствуясь требованиями таблицы 2.14. При повышенном содержании серы, сыше 0,012%, необходимо нанести новый шлак, путем добавления негашеной извести, плавикошпатового концентрата ФК 65 и шамотного боя в соотношении 1,2;1,0;1,0.

Таблица 2.14 – Корректировка химического состава по результатам анализа

Требуемое изменение в содержании элементов	Наименование вводимого вещества	Расчетное количество вводимого вещества, в кг, на следующее количество расплава, т.					
		1	20	25	44	50	18
Увеличение углерода на 0,1 %	Графит измельченный	1,2	24	30	53	60	22
Увеличение кремния на 0,1 %	Ферросилиций ФС75-3	1,5	29	36	65	73	26
	Ферросилиций ФС45-3	2,5	50	63	110	125	45
Увеличение марганца на 0,1 %	Ферромарганец ФМн78	1,5	29	36	63	71	26
	Ферромарганец ФМн70А-3	1,6	32	40	70	79	29
Увеличение меди на 0,1 %	Прутки меди марки ГЛ 20 Л	1	20	25	44	50	18
Снижение углерода на 0,1%	Стальные пакеты	31	625	781	1375	1562	558
	Ферросилиций ФС 45-3	1,5	20	25	44	50	27
	Ферросилиций ФС 75-3	1,3	26	33	57	65	23
Снижение кремния на 0,1 %	Стальные пакеты	52	1036	1295	2280	2590	936
	Графит измельченный	2,3	46	57	100	114	41

После доводки химического состава и перед переливом расплава чугуна в печь ожидания, необходимо направить вторую пробу в лабораторию. Затем расплав при помощи желоба разливают в печи ожидания предварительно разогрев его до температуры 1570-1590 С°. После слива, зеркало жидкого чугуна очищают от шлака, затем, во избежание интенсивного угара углерода и окисления жидкого чугуна, вводят куски электродного боя массой не менее 10 кг.

Химический состав расплава, переливаемого из плавильных печей в печи ожидания представлен в таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Химический состав расплава в плавильной печи

Химический элемент	Обозначение	Содержание, %
Углерод	C	3,50-3,80
Кремний	Si	1,7-2,0
Марганец	Mn	0,4
Сера	S	≤ 0,014
Фосфор	P	≤ 0,05
Хром	Cr	≤ 0,07
Никель	Ni	≤ 1,50

Во избежание ликвации химических элементов, выдача расплава чугуна на линию заливки из печей ожидания, должна осуществляться не ранее чем через двадцать минут после перелива жидкого чугуна в печь ожидания. Химический состав чугуна в печи ожидания должен соответствовать таблице 2.16.

Таблица 2.16 – Химический состав

Отливка	Содержание элементов, %								
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Cu	Ni	Sn
Кронштейн крепления заднего тормоза правый/левый	3,6-3,8	1,9-2,0	0,3-0,4	≤0,012	≤0,05	≤0,07	≤0,3	≤1,5	≤0,03

Для улучшения структуры и повышения механических свойств производят модифицирование чугуна сфероидизирующими модификаторами Elmag 5900, TDAK 6A. Навески модификторов собирают заранее в полиэтиленовые пакеты по 15 кг, с допуском на отклонение массы ± 0,05 кг. Модификатор вводится в сухой прогретый ковш, в противоположную сторону от носка ковша, согласно схеме (рисунок 2.10).

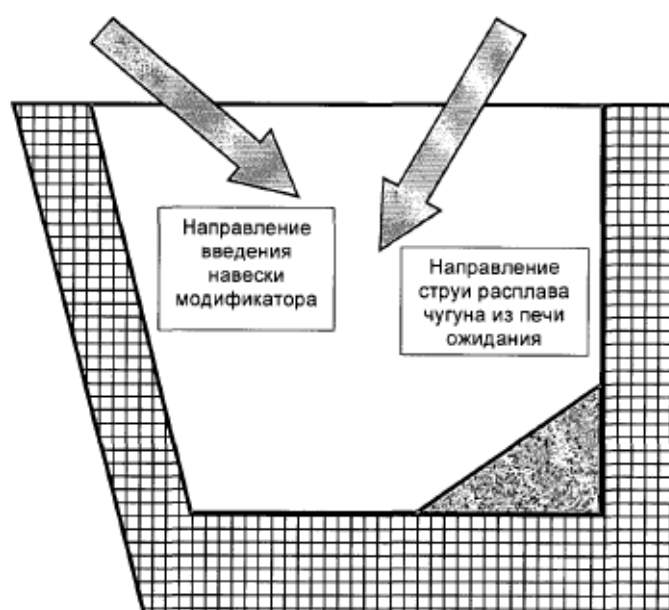


Рисунок 2.10 – Схема введения модификатора

После ввода модификатора, ковш наполнить жидким чугуном без прерывания струи, контролируя вес металла в ковше по весовому устройству. Масса металла в ковше должна быть 1100 ± 20 кг.

После заполнения ковш транспортируется на формовочно-заливочную линию, где с металла снимают шлаковую пленку и измеряют его температуру с помощью термомпары. Температура должны быть 1410-1430 С°. После визуального осмотра на соответствие всем параметрам ковш устанавливают на заливочную линию и начинают заливку жидкого металла по формам. При заливке форм, литниковую чашу заливщик должен заливать максимально полной без прерывания струи и доливов металла в чашу.

Перед заливкой в чашу каждой формы укладывается по одному куску графитизирующего модификатора ФС 75-3 массой 150-200 грамм.

2.3.3 Состав формовочной смеси

Отливки из чугуна получают в песчано-глинистых формах, материал составляющей эти формы называется формовочной смесью. Формовочные смеси бывают трех видов:

Единая смесь – применяется на автоматических формовочных линиях крупных производств, где нецелесообразно обеспечение разделения смесей. Такие смеси имеют в своем составе более огнеупорные составляющие, чтобы обеспечить более долгую. Чем более огнеупорный материал, тем ниже потери активных включений при прокаливании смеси, следовательно, возможно добавление меньшего количества свежих составляющих в каждом замесе.

Наполнительная смесь - применяется в паре с облицовочной смесью. Используется для заполнения остатка формы, после уплотнения облицовочной смеси. В составе наполнительной смеси доминируют

отработанные материалы, так как требования к качеству и физико-механическим свойствам ниже.

Облицовочная смесь – используется для создания поверхности формы, соприкасающейся с расплавом. Особенностью таких смесей, являются повышенные физико-механические свойства, а также в их составе процент отработанной смеси минимален.

Формовочная смесь приготавливается в центробежных смесителях, путем смешения воды отработанной смеси, свежего бентонита и песка, после чего отгружается в бункера формовочных машин. Состав замеса приведен в таблице 2.17.

Таблица 2.17 – Состав одного замеса

Наименование материала	Состав формовочной смеси
	Масса материала на замес, кг
	% по массе
Песок формовочный кварцевый	0,00-100,00
	0,00-5,00
Бентопорошок активированный	0,00-50,00
	0,00-2,50
Концентрат или «Бентакарб-ВС»	0,00-50,00
	0,00-2,50
Противопригарная добавка	0,00-6,00
	0,00-0,30
Отработанная формовочная смесь	1800-2000
	90,0-100,0
Вода производственная	До влажности в пределах требований в таблице 2.15

Песок формовочный кварцевый применяется в виде смеси песка марок 1К₂О₂02 и 3К₂О₃016 в соотношении 40/60%.

Бентакарб-ВС представляет из себя порошкообразную смесь бентонита марки П1Т1А и специальных углесодержащих компонентов в соотношении 40/60%. Используется в литейном производстве в качестве добавки в формовочную песчано-глинистую смесь с целью придания прочности литейным формам, предотвращения пригара и уменьшения шероховатости поверхности чугунных отливок.

Отработанная формовочная смесь – это смесь прошедшая цикл заливки и выбивки. Перед тем как попасть в смеситель повторно, смесь охлаждается и увлажняется в зависимости от ее температуры и остаточной влажности, а так же проходит через магнитный сепаратор.

Различные характеристики смеси регулируются количеством того или иного компонента в её составе. Требуемые значения характеристик формовочной смеси приведены в таблице 2.18.

Таблица 2.18 – Технологические характеристики формовочной смеси

Наименование характеристики	Границы регулирования характеристик
Прочность при сжатии кгс/см ²	1,00-1,90
Влажность формовочной смеси, %	3,00-4,50
Газопроницаемость, ед.	90-190
Уплотняемость, %	38±5
Потери при прокаливании, %	3,00-5,00
Общая глинистая составляющая, %	9,0-18,0
Модуль мелкости (ММ), ед.	58,0-70,0
Температура отработанной смеси, С°	≤ 42
Влажность отработанной смеси, %	1,00-2,00
Активный бентонит, %	-
Прочность в зоне конденсации влаги, N/см ²	Не менее 0,22

Для увеличения прочности на сжатия необходимо увеличить, а для снижения уменьшить количество ввода бентопорошка в смеситель. Для стабилизации прочности на сжатия нужно постоянно поддерживать максимальный уровень отработанной смеси в бункерах.

Влажность формовочной смеси регулируется количеством вводимой воды.

При снижении газопроницаемости увеличивают дозировку свежего формовочного песка более крупной фракции.

2.3.4 Конструкция литейной оснастки

Литейная оснастка представляет из себя две полуформы верха и низа, на которых располагаются модели и элементы литниковой системы:

- Литниковая чаша: служит для первичной приемки металла, форма её такова, что предотвращает его разбрызгивание и способствует его протеканию в стояк без захвата воздуха;

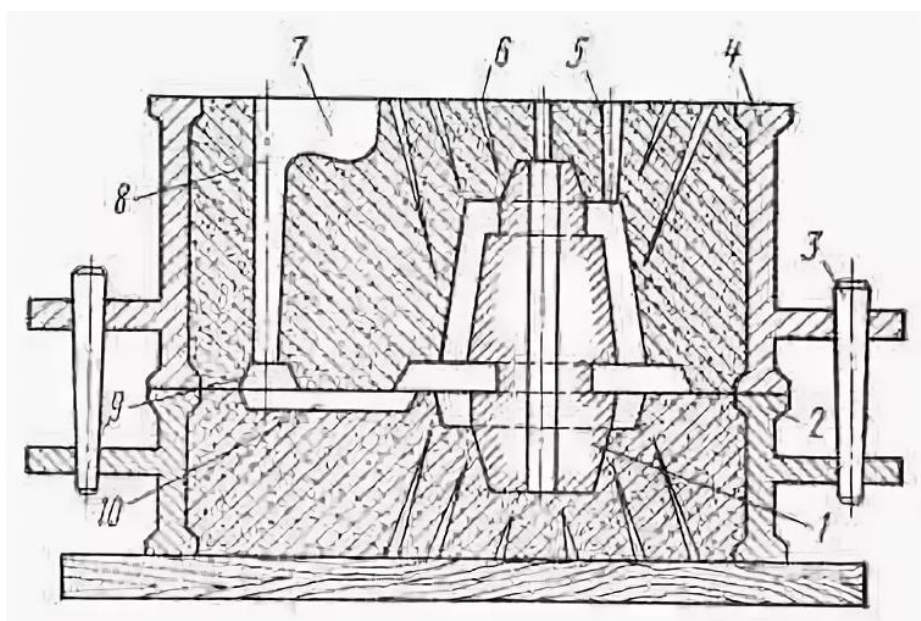
- Стояк: вертикальный канал по которому расплав подается в плоскость разъема формы;

- Зумпф: сферическое углубление, расположенное под стояком. Служит для предотвращения размывания формы потоком расплава и способствует более плавному изменению направления течения потока металла;

- Шлакоуловитель: служит для подвода металла к питателям. Располагается как правило в полуформе верха, что способствует удержанию частичек шлака и нежелательных включений, которые всплывают и удерживаются в шлакоуловителе;

- Питатели: предназначены для подачи металла, непосредственно, в тело отливки;

- Выпоры: выполняют роль газоотводящих каналов, для исключения появления дефектов в виде газовых раковин (рисунок 2.11) [7].

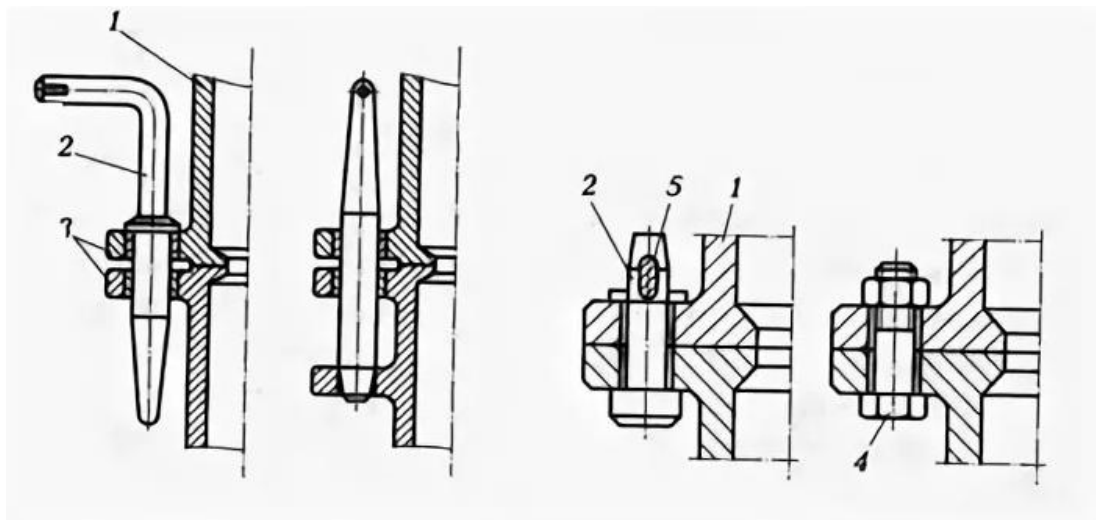


1 - стержень; 2 - нижняя опока; 3 - штифт; 4 - верхняя опока; 5 - выпор; 6 - каналы; 7 - литниковая чаша; 8 - вертикальный стояк; 9 - шлакоуловитель; 10 - питатель

Рисунок 2.11 – Схема песчано-глинистой формы [8]

Важной частью литниковой системы, определяющей качество будущей отливки, являются прибыли. Прибыль - это полость в форме примыкающая к наиболее проблемным либо массивным частям отливки, которая служит для подпитки этих мест горячим металлом. При кристаллизации металл ужимается в объеме, что приводит к образованию усадочных раковин. При наличии прибыли, в процессе кристаллизации, ещё жидкий металл из прибыли подпитывает тело отливки, таким образом усадочная раковина перемещается в прибыль.

Так как расплав имеет большую плотность, при заливке его в форму, на опоку верха начинает действовать гидродинамическое и гидростатическое давление. Эти силы приводят к тому, что опока может приподняться, под напором заливаемого металла. Подъем опоки может привести к вытеканию расплава за пределы формы по поверхности разъема и изменению геометрии отливки. Для исключения такого риска, на опоки укладывают груз, который в несколько раз превышает массу заливаемого металла. При массовом производстве опоки имеют специальные установочные места под крепежные болты, скобы либо струбцины (рисунок 2.12).



1 - опока; 2 - штырь; 3 - втулка; 4 - болт; 5 - клин

Рисунок 2.12 – Крепление опок штырем (а), штырем и клином (б), болтом (в) [8]

2.4 Выводы

1. Произведена классификация отливки по девяти факторам сложности. Отливке присвоена 2-ая приведенная группа сложности
2. Разработана электронная модель отливки и её чертеж.
3. Составлено описание технологии литья: состав шихты, методы модифицирования расплава, контроля его химического состава и технология заливки.
4. Найден состав формовочной смеси для литейной формы, технология приготовления формовочных смесей, методы контроля качества и контролируемые параметры.
5. Определена типовая конструкция литейной оснастки, описано назначение основных ее элементов.

3 Моделирование процесса литья из чугуна детали «Суппорт»

3.1 Разработка электронной модели литниковой системы

Для процесса моделирования литья детали «Суппорт» необходимо разработать математическую модель литниковой системы, питающей отливку.

В модели отливки заранее учтены места расположения прибылей. Прибыли располагаются в массивных частях отливки, во избежание появления в этих местах усадочных раковин и рыхлоты. Подвод металла в отливку осуществляется через литниковый канал, соединяющий центральный литник и прибыль. Центральный литник вместе с металлоприемником симметрично проходит через центр формы, в котором располагается стояк с заливочной чашей. Так как в технологии литья заложено использование пенокерамических фильтров, рекомендуется использовать открытую литниковую систему без шлакоуловителя. Суть открытой литниковой системы заключается в постоянном увеличении проходного сечения на пути следования металла.

Проектирование оснастки начинается с определения количества отливок в литейной форме, которое зависит только от габаритов опоки и самой отливки. При расположении отливок в форме необходимо учесть некоторые правила: расстояние которое проходит металл от стояка до отливки должно быть приблизительно одинаковым для всех гнезд; расстояние от края опоки до полости заполняемой металлом не менее 30 мм; учесть возможность подвода металла к месту расположения прибыли. На рисунке 3.1 представлено примерное расположение отливок, сплошной линией обозначен контур опоки, пунктирной - зона плохой уплотняемости (50мм).

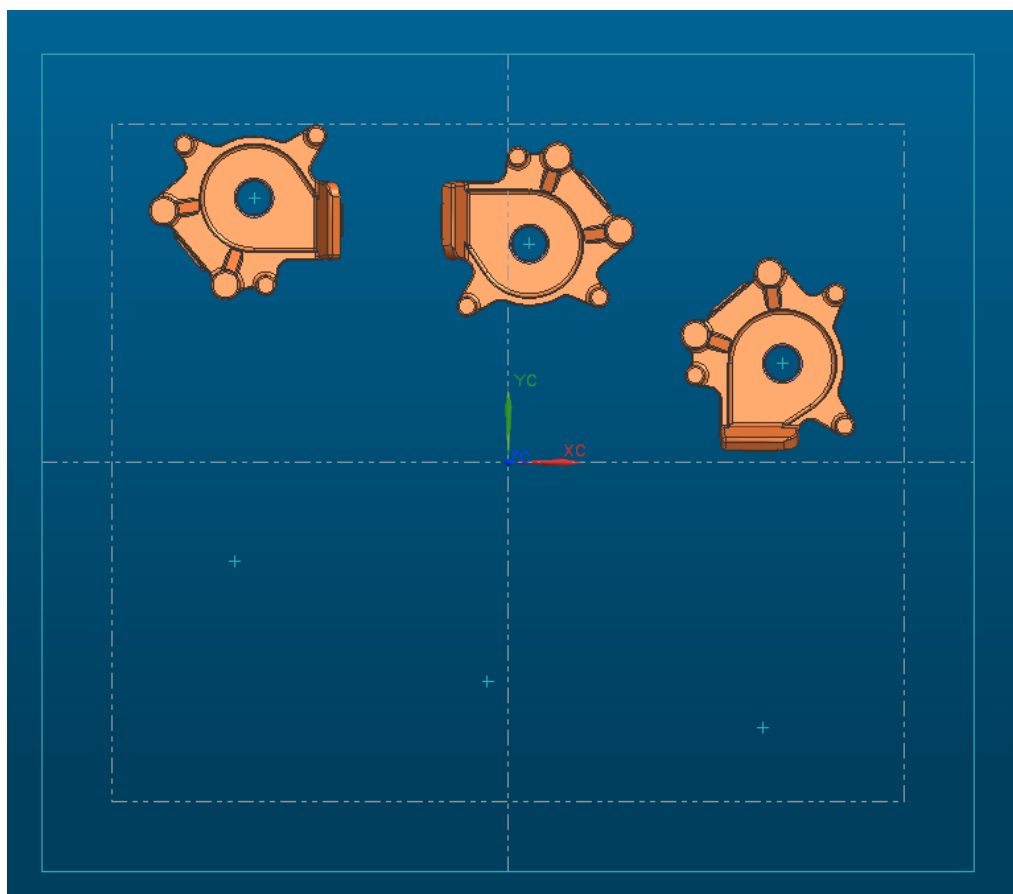


Рисунок 3.1 – Расположение отливок в форме

После определения мест расположения отливок, необходимо расположить стояк, металлоприемник и литниковый ход, так чтобы они не накладывались на отливки и будущие прибыли. Стояк вместе с заливочной чашей располагаются в центре формы, следовательно и центральный литник проходит через середину под любым углом (рисунок 3.2).

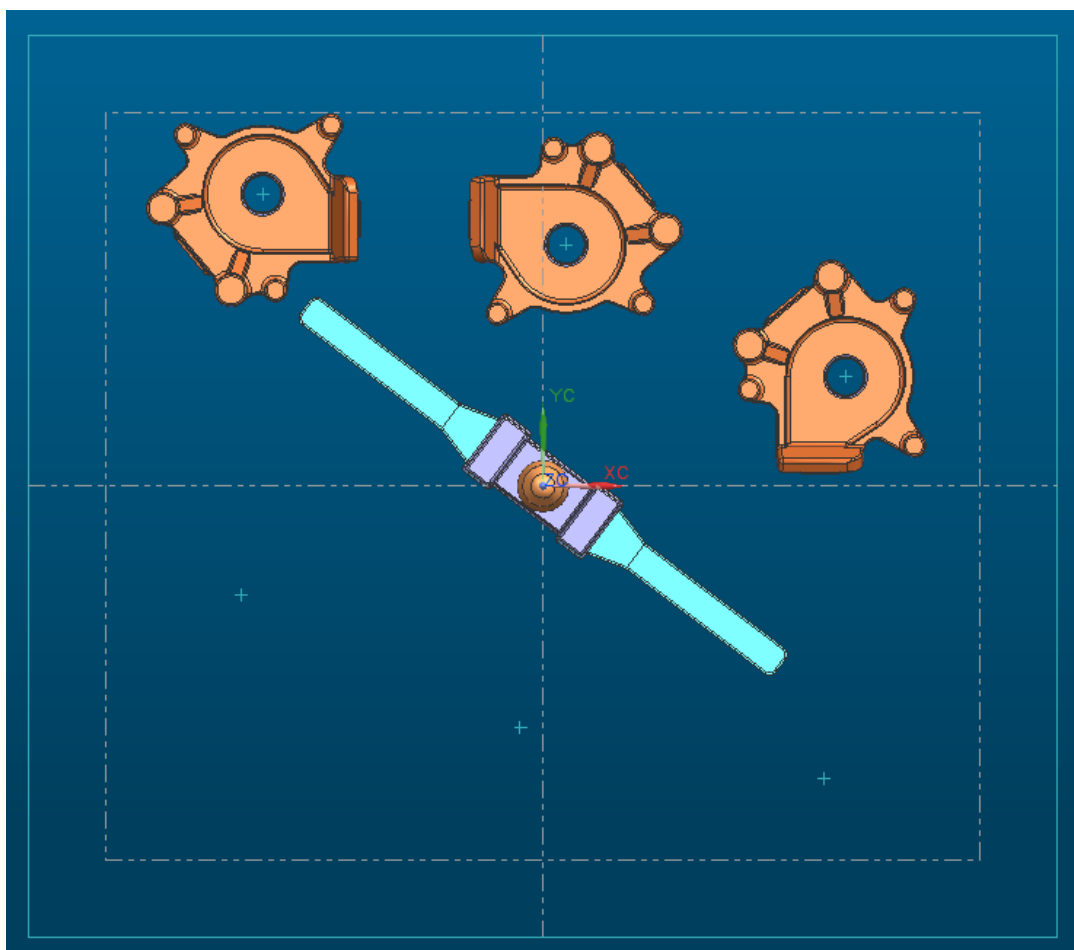


Рисунок 3.2 – Расположение литника в форме

Затем, необходимо определить место подвода металла к отливке. Так как отливка имеет кривизну линии разъема, прибыли будут находиться на разной высоте. Подвод лучше осуществлять в месте, которое требует больше питания во время кристаллизации, способствует лучшему заполнению формы, что упрощает конструкцию оснастки. Поэтому прибыль, расположена в «хвосте» отливки. Так как при подводе с другой стороны прибыль в «хвосте» будет холоднее и ей будет трудно обеспечить заполнение сложной формы отливки. Так же под места изменения направления разъема, необходимо делать вставки (в полуформе верха) и врезки (в полуформе низа) (рисунок 3.3). Отливки в форме расположены таким образом, чтобы «хвосты» соседних изделий смотрели друг на друга, чтобы у них была общая площадка с общей прибылью.

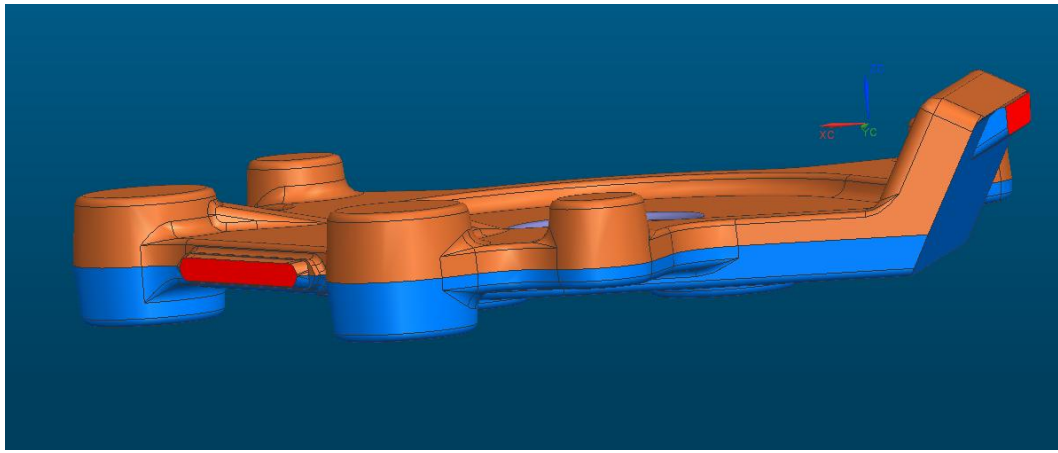


Рисунок 3.3 – Места размещения прибылей

Для построения прибылей и подводящих к ним металл литников, необходимо схематично построить плоскость разъема. Это действие позволит избежать нестыковок при проектировании оснастки и подобрать более точную форму литников (рисунок 3.4).

Когда разъем построен, устанавливаются прибыли и литники, повторяющие его профиль (рисунок 3.5).

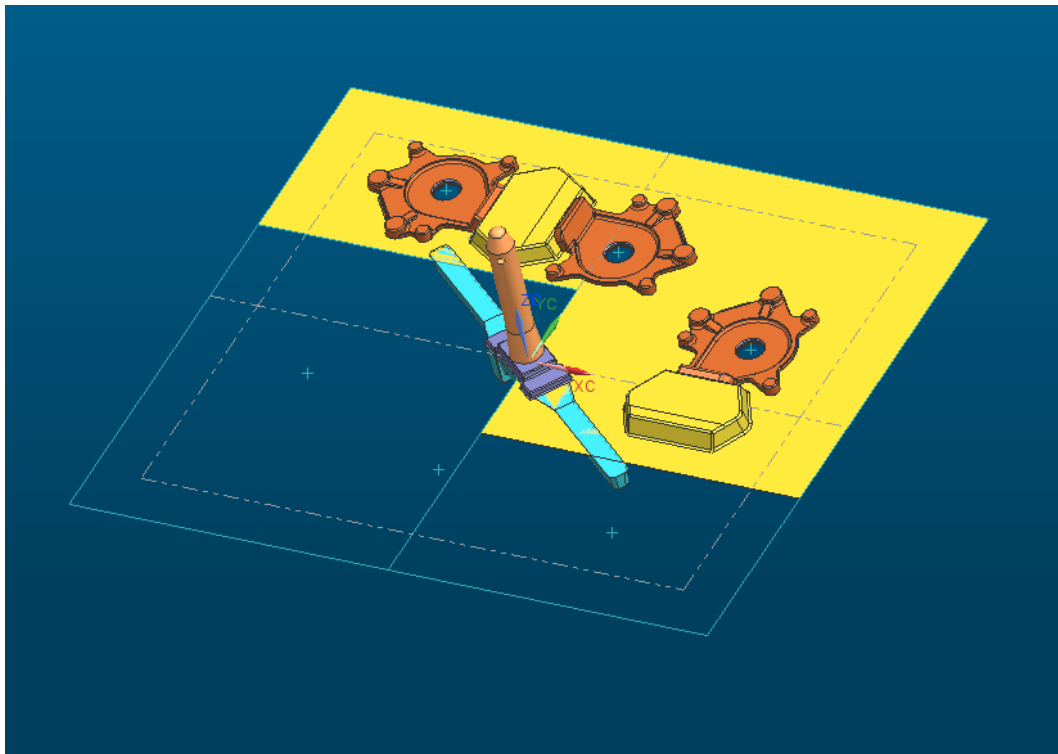


Рисунок 3.4 – Плоскость разъема

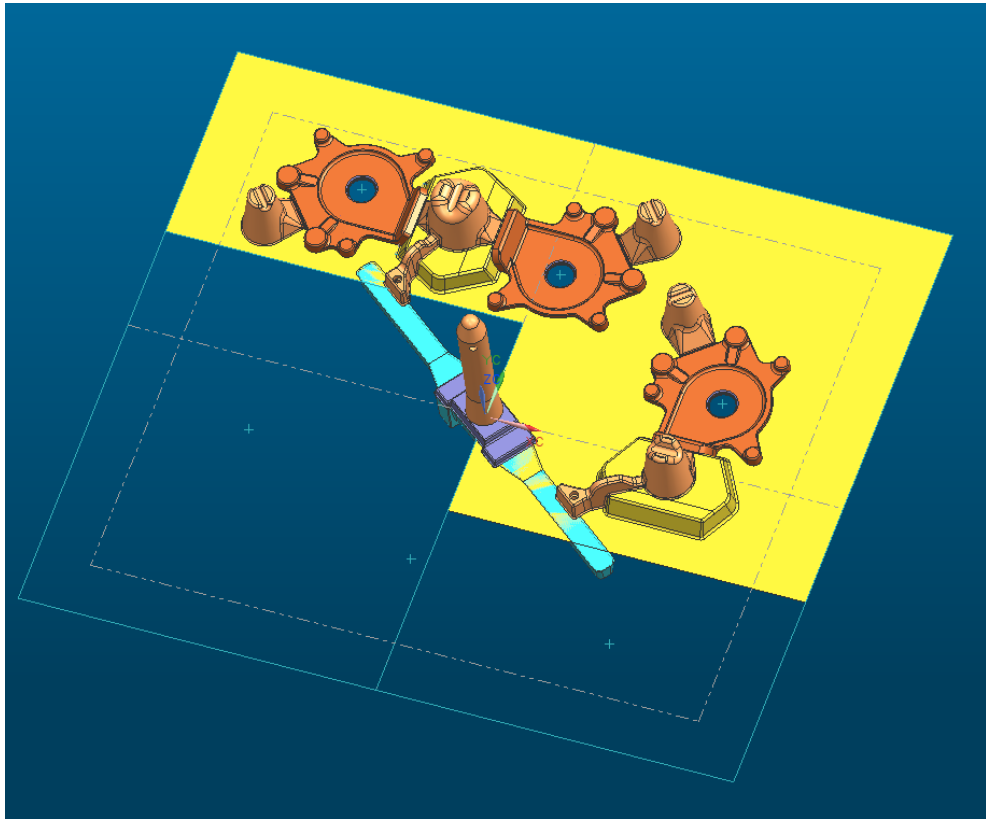


Рисунок 3.5 – Установка прибылей и литников

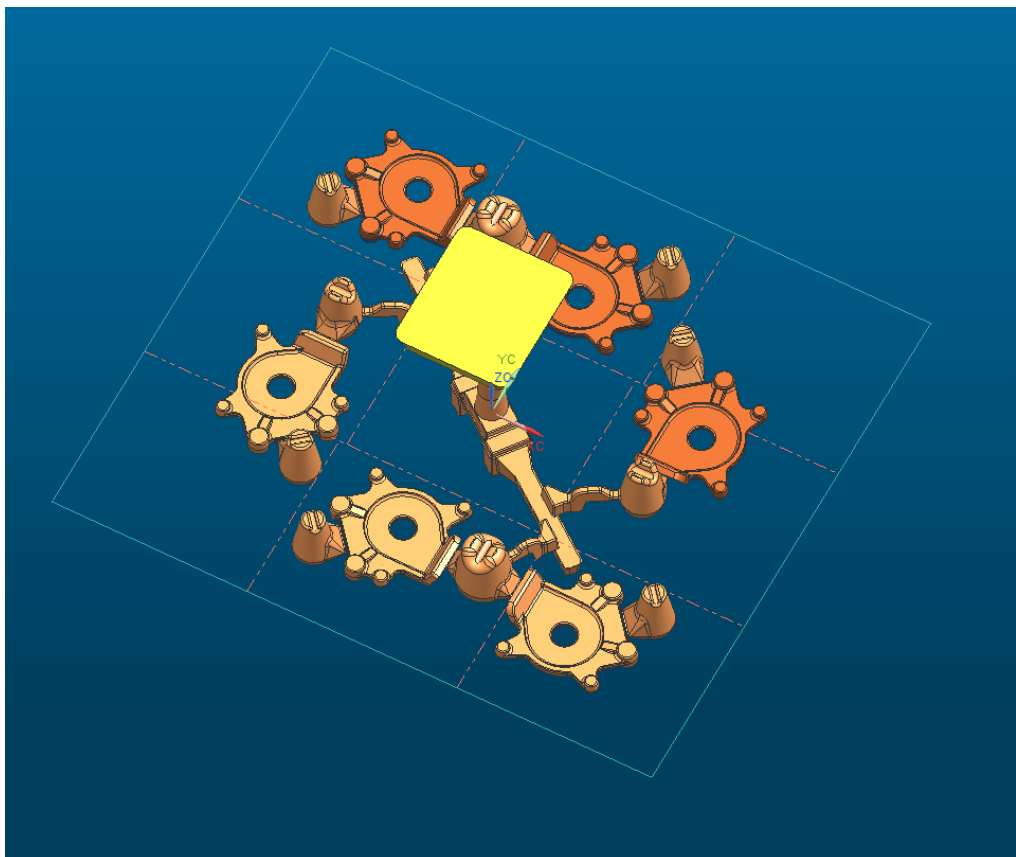


Рисунок 3.6 – Готовый «куст»

Завершающим шагом является применение к отливкам, прибылям и питающим литникам операции кругового массива, для получения полноценной модели куста.

Для конвертирования модели "куста" (рис.3.6) в формат STL необходимо снять связанные тела со всех элементов и выполнить их объединение, после чего запустить экспорт модели.

3.2 Создание сетки конечных элементов

Программный продукт LVMFlow производит расчеты основываясь на МКР. Основой метода конечных разностей выступают уравнения, записанные в дифференциальной форме. Они строятся на ортогональных сетках, в LVMFlow конечный разностный элемент имеет форму куба. Сутью метода является сведение всех задач к одномерным, это ускоряет процесс решения общих систем уравнений и ускоряет процесс.

Недостатком метода выступает слабая аппроксимация границ. Это приводит к тому, что расчет уравнений гидродинамики становится не таким точным, а также при расчете тонкостенных отливок, когда шаг сетки сравним с толщиной изделия. Однако эти ограничения не влияют на уравнения теплопроводности, что является более приоритетной задачей программы. Отсюда следует, что шаг сетки необходимо подбирать исходя из правила 4 конечных элемента на самую тонкую стенку. Так же стоит учитывать объем оперативной памяти, требуемый для вычислений, он должен быть меньше фактического объема оперативной памяти компьютера.

Для создания сетки конечных элементов необходимо произвести импорт математической модели литниковой системы в программу LVMFlow. Для этого в стартовом окне программы требуется выбрать приложение «Import 3D files» (рисунок 3.7).

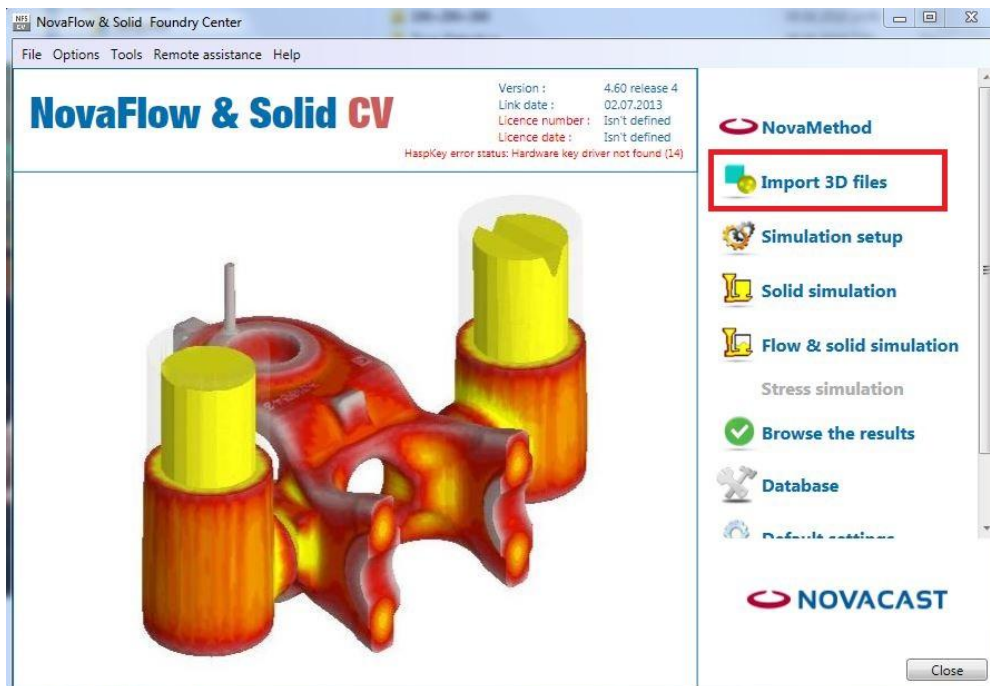


Рисунок 3.7 – Главное окно программы LWMFlow

Затем, в открывшемся приложении выбрать ярлык «открыть» и указать путь к уже готовому STL файлу с математической моделью литниковой системы, после чего сохранить результат. В данном приложении элементы литниковой системы можно загружать как одним файлом, так и по отдельности, если таковое разделение требуется (рисунок 3.8). При загрузке по отдельности, файлы по умолчанию отправляются в папку «отливка», после чего их надо рассортировать вручную.

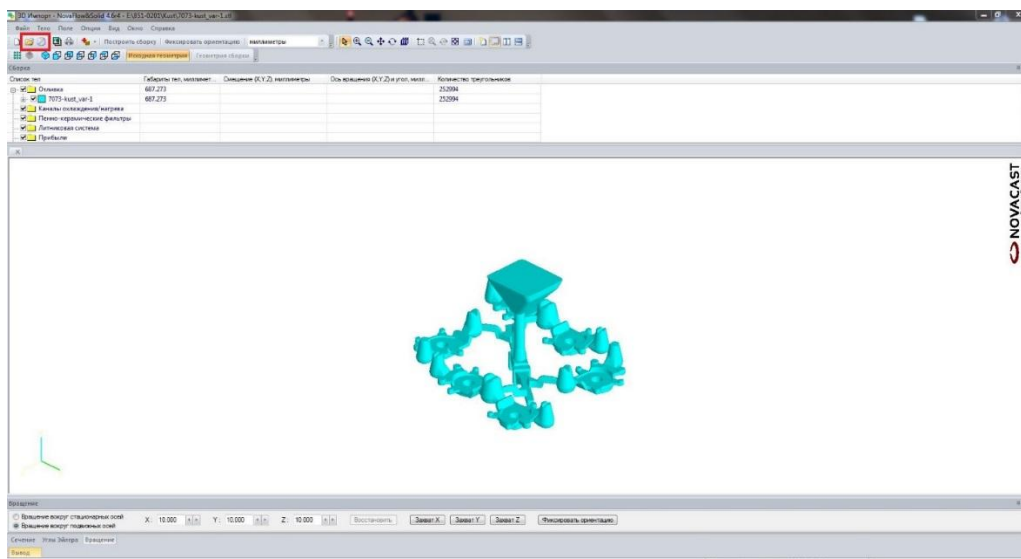


Рисунок 3.8 – Импорт STL – файла

Для создания сетки конечных элементов требуется запустить приложение «Simulation setup» (рисунок 3.9).

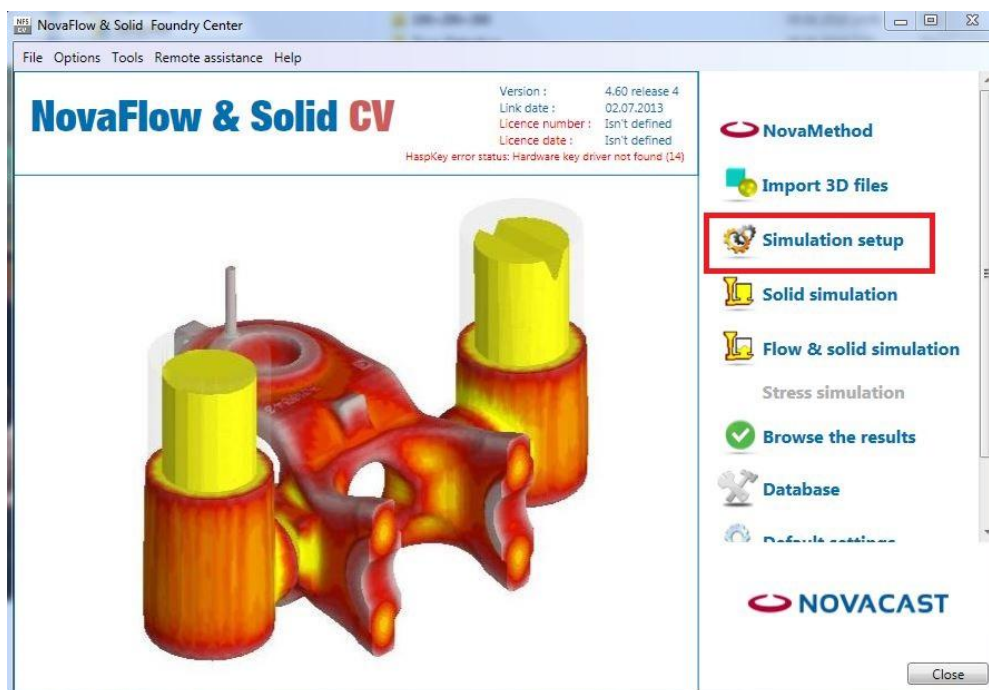


Рисунок 3.9 – Запуск приложения настроек симуляции

В открывшемся приложении выбрать ярлык «Параметры сеточной модели» и задать размер конечного элемента исходя из правила 4 конечных элемента на самую тонкую стенку(рисунок 3.10).

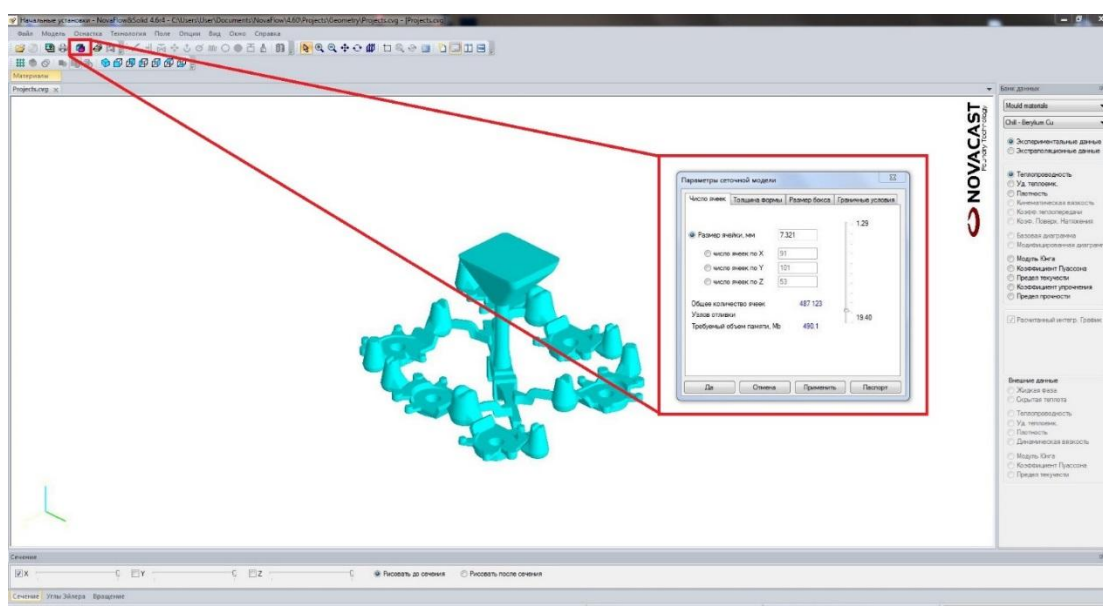


Рисунок 3.10 – Задание параметров сетки

3.3 Задание начальных и граничных условий

Для получения достоверных результатов, необходимо задать начальные условия, характеристики материалов, соответствующие реальным значениям.

Характеристики формовочной смеси (литейной формы):

Прочность при сжатии – 0,1-0,18 МПа

Влажность – 3,00-4,00 %

Газопроницаемость 90-150 ед.

Уплотняемость – 38 %;

Общая глинястая составляющая 9,0-15,0 %;

Температура формы – 40 С°;

Материал расплава – ВЧ-50:

Согласно ГОСТ 7293-85 характеристики ВЧ-50:

Временное сопротивление при растяжении МПа – 500;

Условный предел текучести МПа – 320;

Относительное удлинение, % – > 7;

Ударная вязкость, кг*см/см² – 2,0;

Температура расплава – 1380 С°;

Так же учитывается температура окружающей среды, она же температура воздуха в форме до заполнения её расплавом 20 С°;

Литье в песчаные формы выполняется гравитационным методом литья (заливка с ковша), для него в программе есть свой алгоритм и свои настройки. Эти настройки учитывают высоту занесения ковша над литниковой точкой, угол наклона струи и её диаметр. Литниковая точка задается в любом месте на границе расчетной области, которая принадлежит телу «куста». Так же программа позволяет задавать границы формы, относительно расположения куста, что позволяет приблизить результаты теплотерь к реальным.

Для расчета принимаются следующие параметры (рисунок 3.11):

Высота подачи струи относительно заливочной чаши – 200 мм;

Угол наклона струи – 15°;

Диаметр струи металла – 32 мм;

Окно задания параметров заливки приведено на рисунке 3.11.

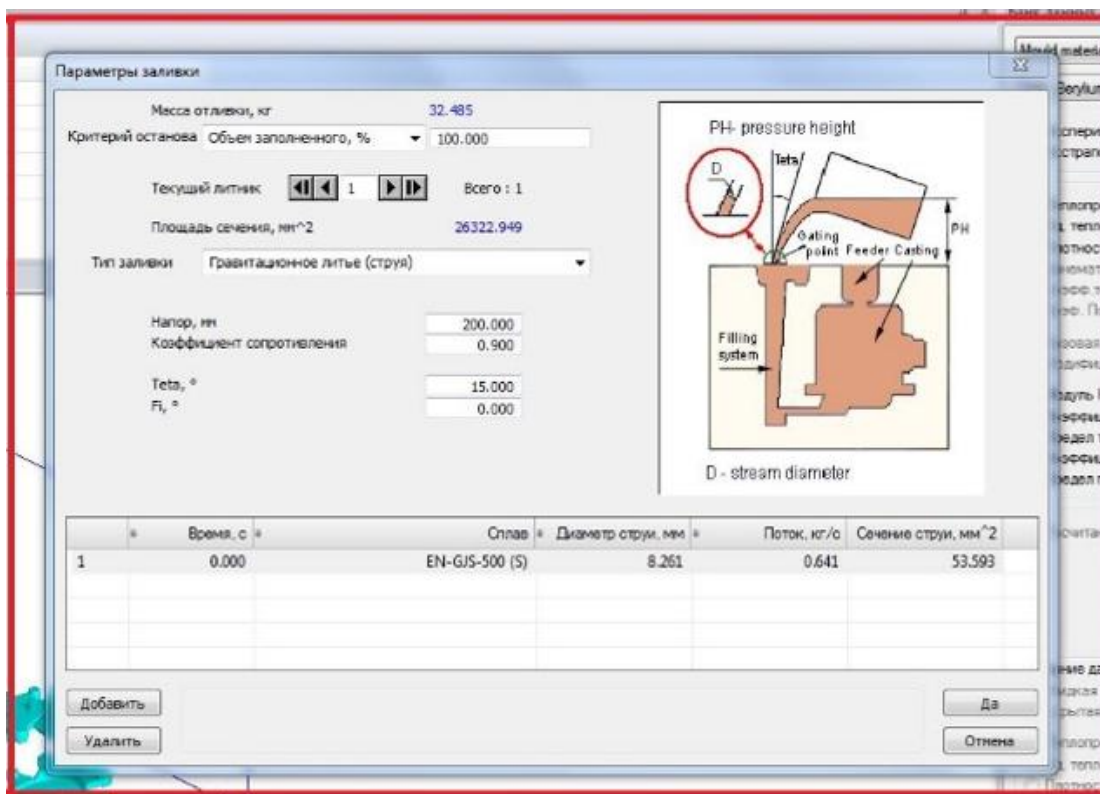


Рисунок 3.11 – Параметры заливки

Программа позволяет вводить дополнительные параметры заливки на границе металл форма, например, имитировать нанесение противопригарного покрытия. Присутствует возможность расчета, зазора возникающего в следствии усадки, при кристаллизации металла. Для получения более точных данных о поведении формы и расплава в конкретном месте, можно устанавливать так называемые датчики. Они позволяют получить данные в виде графиков зависимостей и функций с места установки, например, колебания температуры, изменение скорости течения расплава или доли жидкой фазы.

3.4 Моделирование заполнения и кристаллизации

Когда входные параметры для расчета заданы, можно приступить к моделированию кристаллизации и заполнения формы. В LVMFlow есть три основных модуля в которых ведется расчет:

«Моделирование течения расплава» - в этом модуле рассчитывается заполнение литейной формы расплавом, без учета теплопередачи материалов. Расплав принимается как идеальная жидкость, и его течение описывается уравнениями Навье-Стокса. Для анализа поведения шлаковых частичек и неметаллических включений программный продукт обладает функционалом, позволяющим задавать диаметр частиц, присутствующих в расплаве. Данный модуль удобен для анализа сложных литниковых систем, проверки распределения потоков расплава и его скоростей.

«Кристаллизация» - этот модуль характерен тем, что форма по умолчанию считается заполненной и моделируется лишь процесс кристаллизации расплава, с учетом температурных полей. Модуль удобен при моделировании простых литниковых систем, когда не требуется анализировать процесс заполнения формы. В основе модели лежит неравновесная теория кристаллизации многокомпонентного сплава.

«Полная задача» - модуль объединяет в себе функционал вышеописанных модулей и наиболее удобен для комплексного анализа качества проектирования литейной оснастки.

Все решения и процессы во всех модулях основаны на прямоугольной сетке и методе конечных объемов (МКО). Процессы распределения температур и объемов описаны динамической системой уравнений, которая основана на законах сохранения массы, импульса, энергии и уравнениях состояния различных сплавов.

Динамика процесса несет значительное количество информации, поэтому отображению результатов моделирования в пакете отводится большое внимание. Результаты моделирования такие как температура, доля

жидкой фазы, скорость течения расплава, давление в расплаве, частица усадочных дефектов выводят на каждом шаге. Вывод образа отливки (также, как и полей функций, которые характеризуют ее состояние) проводится в виде изометрического изображения (3-D) и в произвольном плоском разрезе (2-D), в цветной гамме, которая отвечает установленной шкале. Функции обращения и масштабирования дополняют возможности просмотра. Для получения более детальной информации можно рассчитать численное значение поля (температуры, доля жидкой фазы, скорости, частицы дефектов) в произвольной точке расчетной области.

В основе модели кристаллизации сплавов пакета LVMFlow лежит квазиравновесная теория. Это макроскопически-феноменологическая теория. В отличие от чистых металлов сплавы кристаллизуются в температурном интервале от температуры ликвидус к температуре солидус. В этой зоне, званой двухфазной зоной, присутствуют как жидкая так и твердая фаза. При этом твердая фаза, которая образовывается, находится в равновесии с жидкой фазой. Низкие значения коэффициентов диффузии элементов сравнительно с коэффициентом температуропроводности сплавов и слабость конвективного смешивания разрешают пренебрегать процессами диффузии как в твердой, так и в жидкой фазах. Главное предположение теории двухфазной зоны – двухфазную зону можно описать с помощью макроскопических функций, аналогично температурным полям $T(r,t)$ полям скорости $V(r,t)$.

Всего выделяют два механизма возникновения усадочных дефектов:

- 1) микропористость (рыхлота)
- 2) макропористость (усадочные раковины)

При недостатке давления ниже зеркала появляется риск возникновения микропористости, даже если это область хорошо подпитана извне. Причинами возникновения микропористости могут стать: затрудненное протекание расплава в твердо-жидкой зоне, высокое значение объемной усадки и изоляция от внешнего давления. Прогнозирование рисков

появления микропористости осуществляется с помощью дифференциального уравнения фильтрационного течения.

Образование макропористости обусловлено недостатком питания тела отливки на этапе кристаллизации. Она как правило образуется в массивных частях отливки. Чтобы предупредить возможность появления дефекта, моделируется движение и возникновение зеркала расплава. Зеркало возникает в момент кристаллизации объемных изолированных от питания участков.

Для выполнения моделирования в программе NX 9.0. было создано несколько вариантов "куста", с различными размерами и местами расположения прибылей. Это позволит на стадии моделирования выбрать наиболее технологичный и экономичный вариант конструкции формы. Расчет произведен в модуле «Полная задача», процесс заполнения формы позволяет определить одновременность заполнения гнезд расплавом, а процесс кристаллизации места возможных усадочных дефектов.

3.5 Анализ процесса литья по стадиям процесса

"Куст" представляет из себя аналог существующей и применяющейся в производстве литниковой системы аналогичного изделия. Масса куста 36 кг.

Результат заполняемости формы расплавом показан на рисунке 3.12, форма полностью заполнена расплавом, недолив отсутствует.

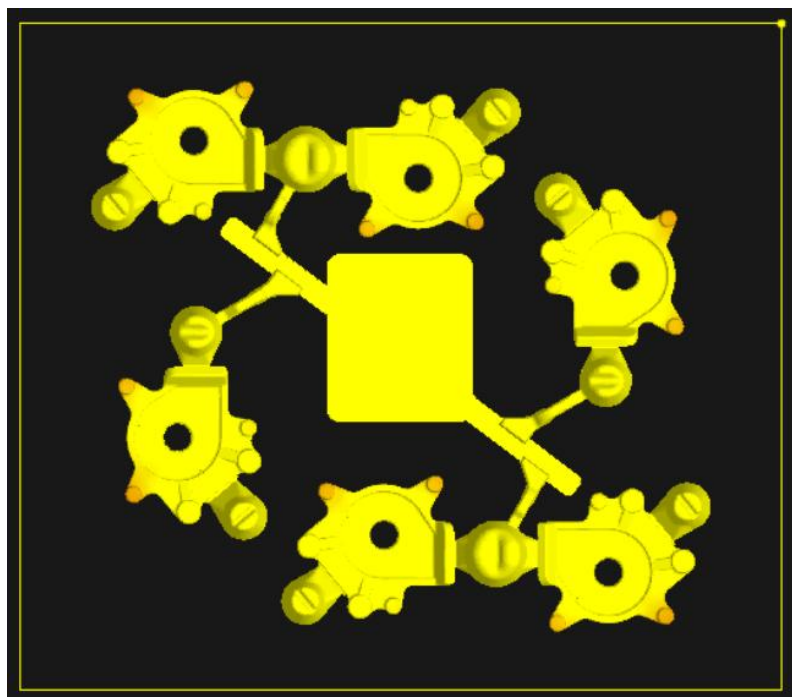


Рисунок 3.12 – Заполнение формы расплавом

На этапе кристаллизации заметны первые проблемы данной литниковой системы. Неравномерная кристаллизация с отрывом полости жидкого металла от питающей её прибыли видна рисунке 3.13.

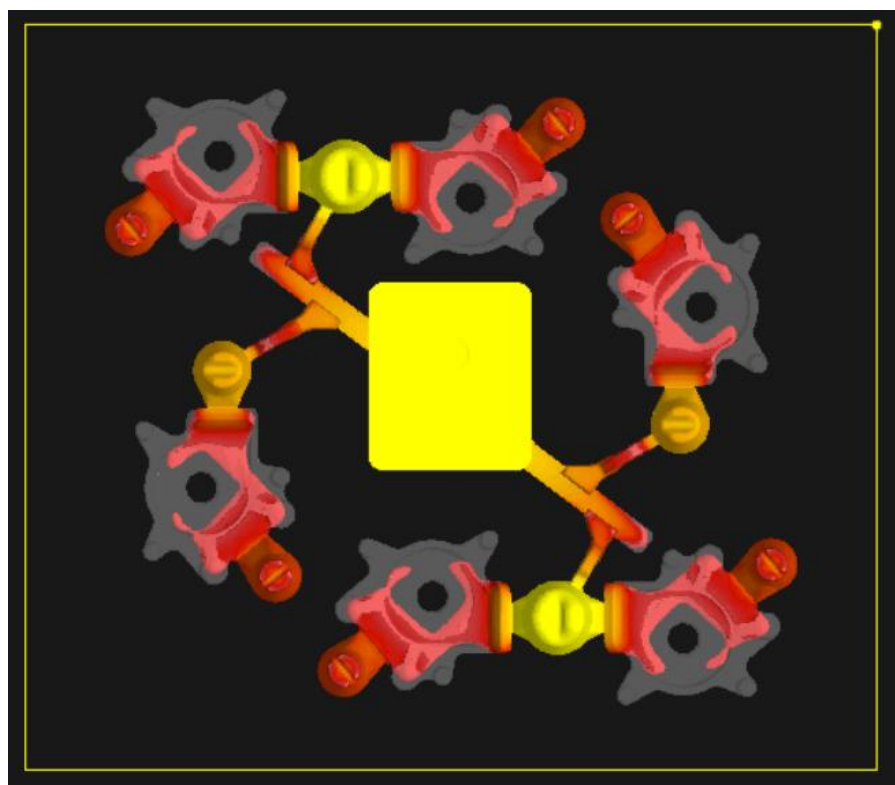


Рисунок 3.13 – Этап кристаллизации

В указанных местах вероятно образование рыхлоты и усадочных раковин и усадочной пористости. Так как деталь работает в агрессивной среде, при постоянных динамических нагрузках подобные дефекты недопустимы. Так же в этих местах располагаются бобышки, подлежащие сверлению, что так же исключает допустимость такого рода дефектов.

Для подтверждения риска возникновения такого дефекта как усадочная пористость, применяют анализ по критерию Нияма, представленный на рисунке 3.14. Данный критерий используется для предсказания образования пористости, возникающей при питании двухфазной зоны, при пологом градиенте температур.

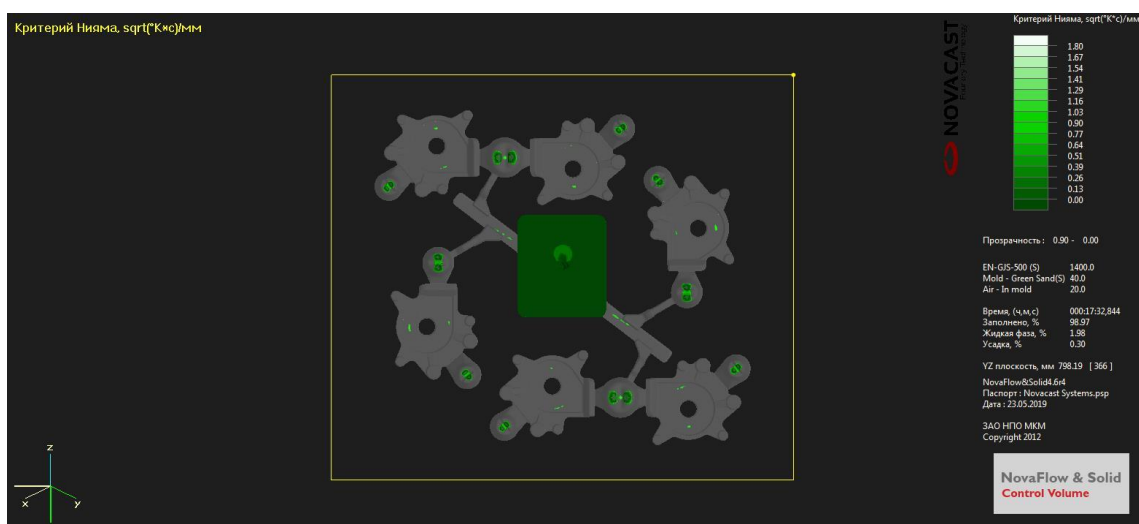


Рисунок 3.14 – Критерий Нияма

Исходя из графики на рисунке 3.14, можно признать отливку годной, однако при изменении техпроцесса, либо одного из параметров заливки, показатели могут измениться в худшую сторону. При больших объемах производства это может привести к большому количеству брака.

Места возможного возникновения усадочных раковин приведены на рисунках 3.15 и 3.16. Все усадочные раковины сконцентрированы в прибылях, заливочной чаше и литнике. Это говорит о том, что отливка получает достаточно питания из прибылей.

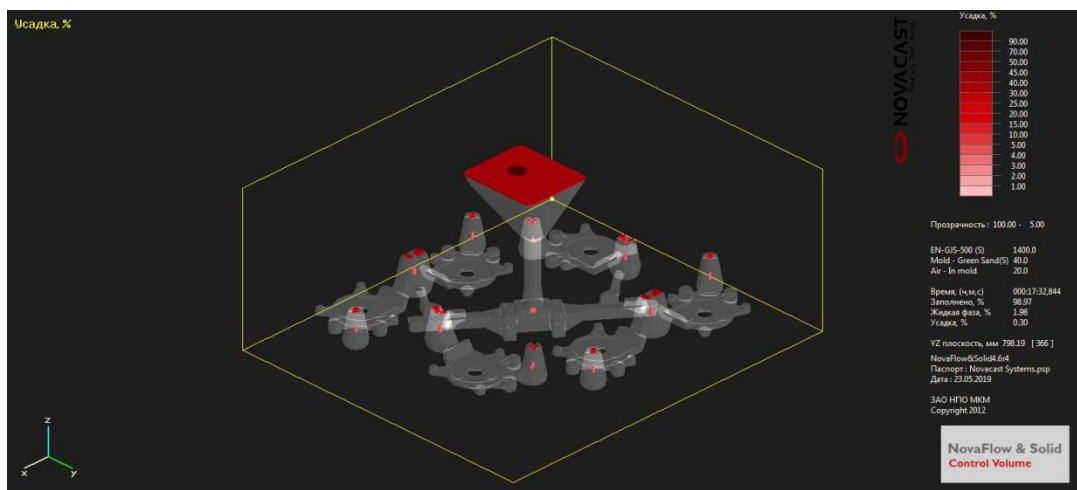


Рисунок 3.15 – Усадочные раковины

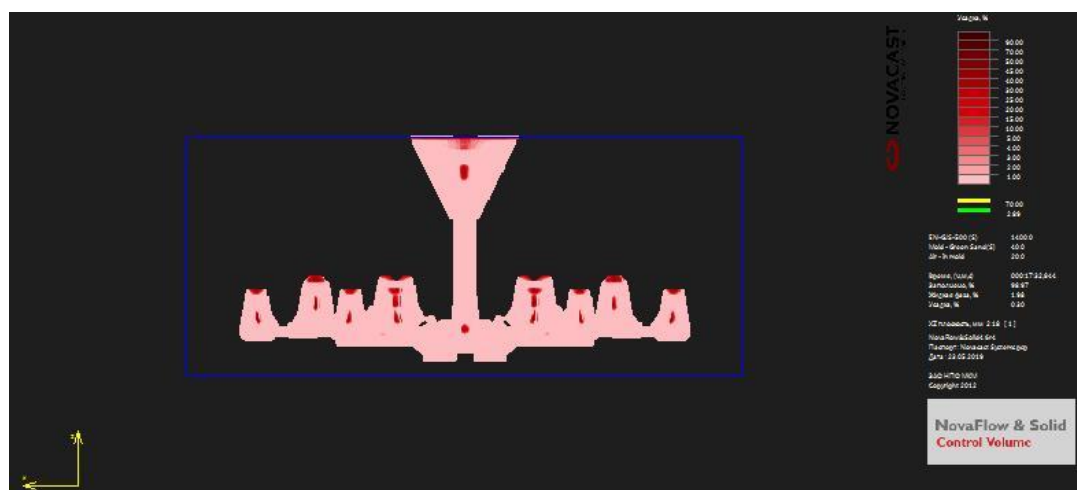


Рисунок 3.16 – Усадочные раковины в разрезе

Так как отливка получает достаточно питания, следует рассмотреть вариант по уменьшению прибылей, что дает возможность поднять выход годного металла. Для оценки такой возможности нужно на этапе кристаллизации выбрать момент с полной кристаллизацией отливки, после кристаллизации питателей и оценить насколько разогреты прибыли (рисунок 3.17).

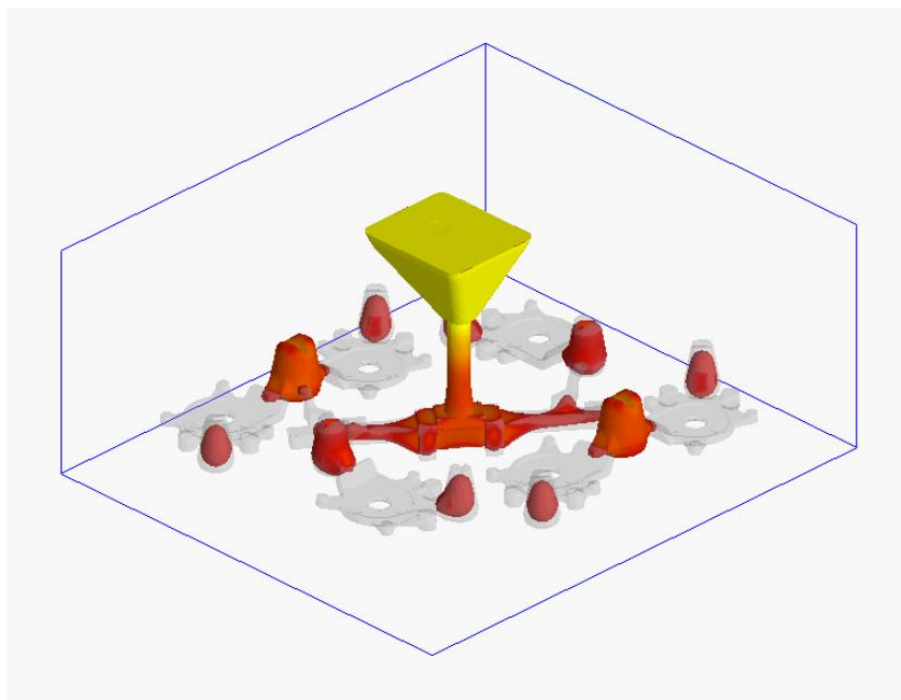


Рисунок 3.17 – Момент кристаллизации отливки

Из рисунка 3.17 видно, прибыли имеют разную степень кристаллизации, этом основании можно уменьшить их объем. Прибыли, через которые осуществлен подвод более горячие, а, следовательно, их объем можно скорректировать более значительно, чем объем тупиковых прибылей.

3.6 Разработка мероприятий по совершенствованию технологии

По результатам моделирования были внесены корректировки в модель куста. Добавлены прибыли в места отрыва жидкого тела от питателя, для получения отливки без рыхлоты и усадочной пористости в этом месте. Объем прибылей оставлен прежним (рисунок 3.7), чтобы выявить эффективность конкретного изменения. Однако, масса куста превысила отметку в 39кг.

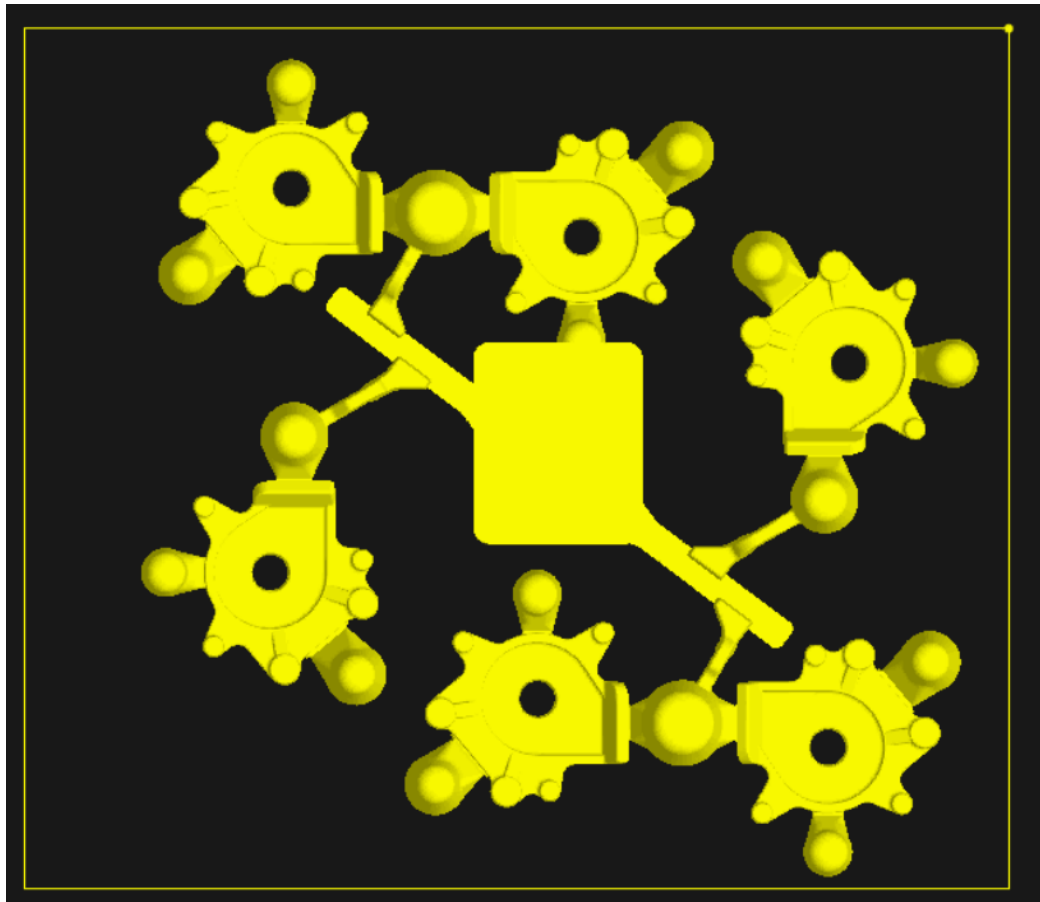


Рисунок 3.18 – «Куст» с дополнительными прибылями

На этапе кристаллизации, указанном рисунках 3.19 и 3.20, аналогичном с первым вариантом заливки, видно, что изменения не дали желаемого результата. Напротив, картина кристаллизации ухудшилась, появилась тонкая шейка жидкого расплава, которая после кристаллизации может создать усадочную пористость.

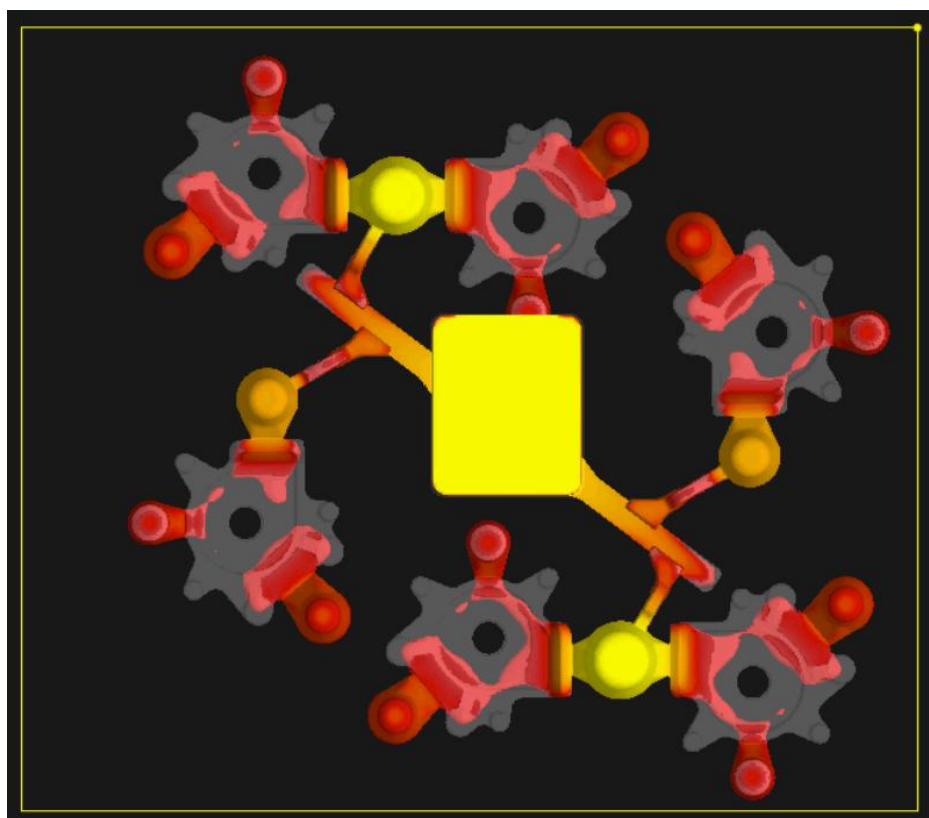


Рисунок 3.19 – Этап кристаллизации

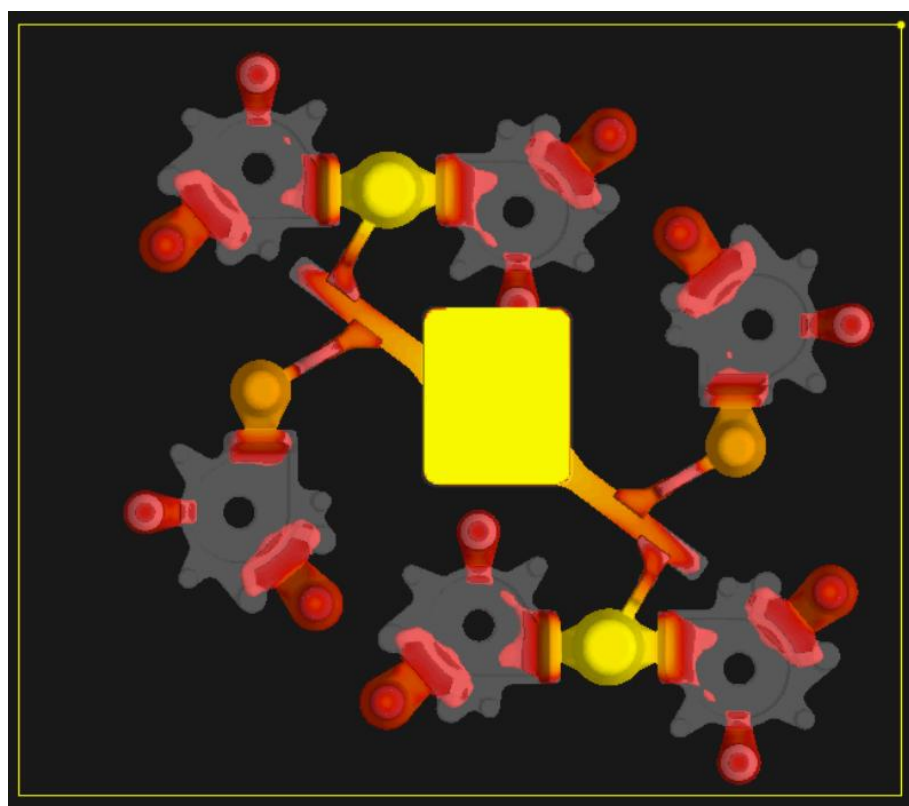


Рисунок 3.20 – Этап кристаллизации

По критерию Нияма, представленном на рисунке 3.21, явных изменений по сравнению с первым вариантом не наблюдается. В части отливок критических точек, в которых может возникнуть дефект, стало больше, в некоторых они переместились в другие места.

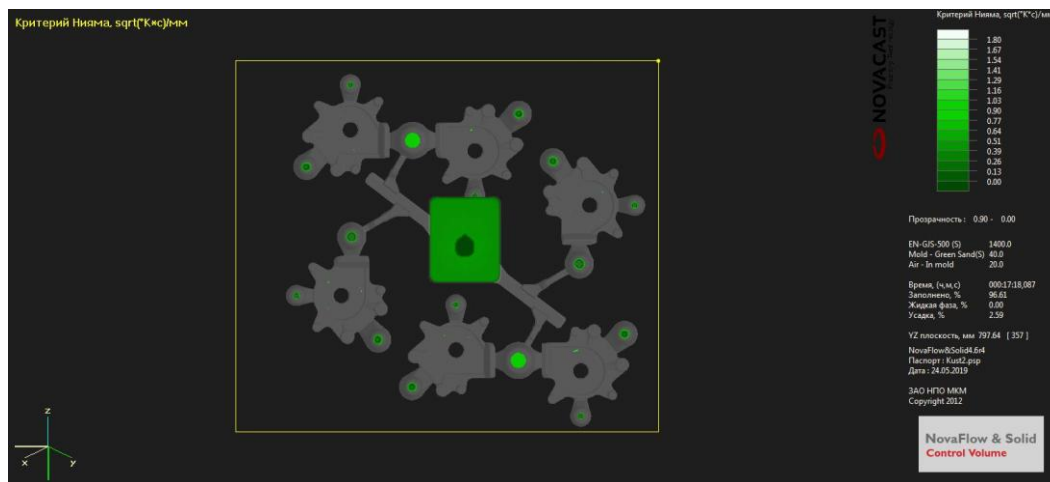


Рисунок 3.21 – Критерий Нияма

Картина усадочных раковин так же не изменилась, все раковины сосредоточены в элементах литниковой системы (рисунок 3.22).

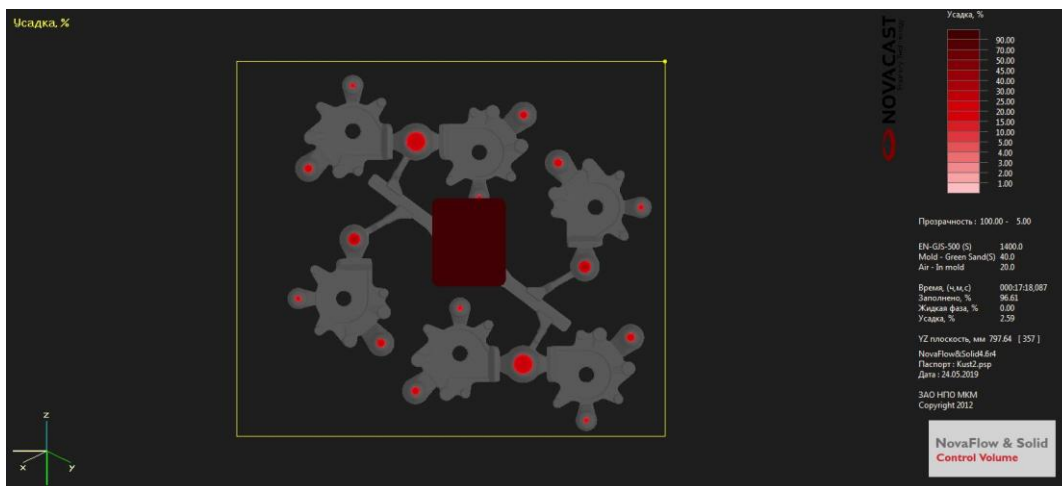


Рисунок 3.22 – Усадочные раковины

Вывод: добавление дополнительной прибыли не дало результат по снижению вероятности брака. Однако, получен отрицательный эффект в виде уменьшения выхода годного металла, поэтому данный вариант не подходит.

Первое моделирование показало, что объем прибылей достаточен для питания отливки, возникают лишь незначительные дефекты. Следовательно, можно уменьшить объем прибылей и получить больший выход годного металла. Чем выше выход годного металла, тем дешевле в производстве отливка, так как меньший объем материала уходит на вторичную переработку.

Был разработан и промоделирован новый «куст» с прибылями меньшего размера (рисунок 3.23), для анализа возможности удешевления производства. Масса куста стала равна 31 кг.

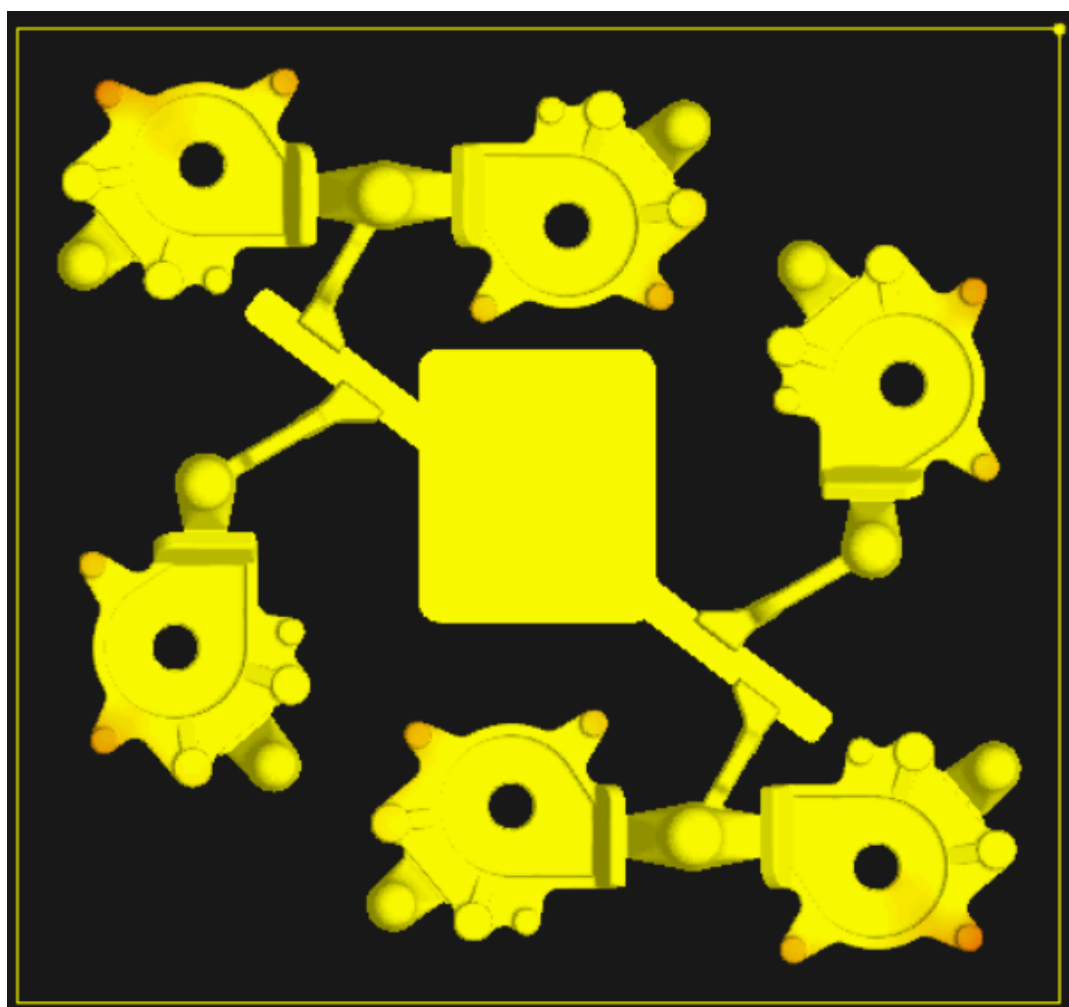


Рисунок 3.23 – «Куст» с уменьшенными прибылями

Картина усадочных раковин осталась неизменной (рисунок 3.24), а показатели критерии Нияма изменились (рисунок 3.25). Видим что усадочная пористость проявилась в других местах. В некоторых отливках «куста» она

исчезла полностью, в других стала более выражена. Перемещающийся характер дефекта, несмотря на симметричность литниковой системы, может говорить о его непостоянстве и о разбросе качества. Однако, в сравнении с результатами других испытаний картина изменилась в лучшую сторону.

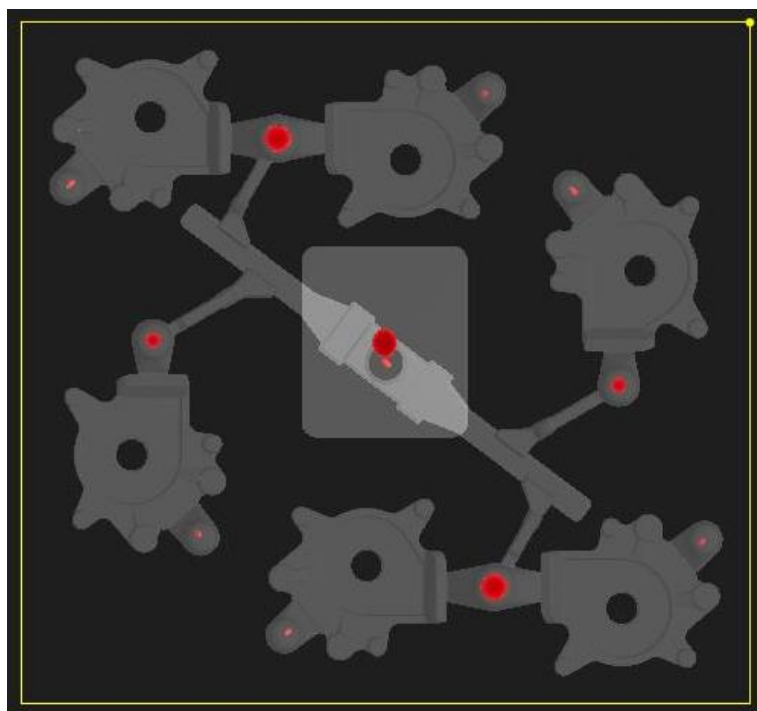


Рисунок 3.24 – Усадочные раковины

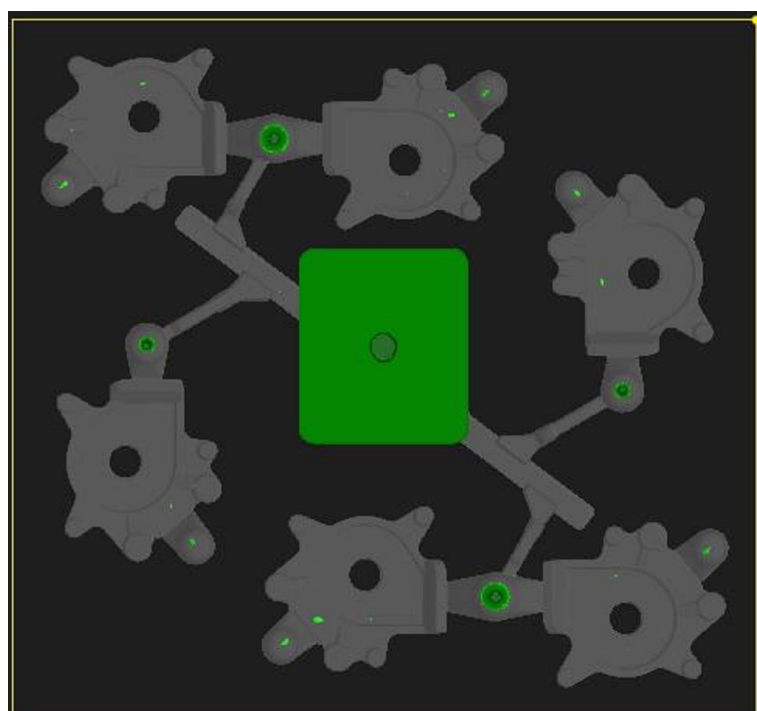


Рисунок 3.25 – Критерий Нияма

Из анализа результатов моделирования, можно сделать вывод, что третий вариант «куста» наиболее выгоден не только с точки зрения экономии, но и с точки зрения качества получаемых заготовок. При массе отливки 1.2 кг и массе куста 31 кг, выход годного равен 23%. Для первого и второго вариантов «куста» выход годного равен 20% и 18% соответственно.

3.7 Выводы

1. Разработана электронная модель сборки "куста" изделий, построена конечно-элементная сетка и определены граничные и начальные условия моделирования.

2. Проведено моделирование литья из ковша в песчаную форму в системе САЕ с целью определения параметров процесса.

3. Установлено, что добавление дополнительной прибыли не привело к снижению вероятности брака. Был получен отрицательный эффект в виде уменьшения выхода годного металла, поэтому данный вариант установки дополнительной прибыли неприемлем.

4. Третий вариант куста с уменьшенными прибылями по наличию дефектов оказался близок к первому. Однако его масса заметно ниже, что делает этот вариант приоритетным.

4 Разработка и параметризация литевой формы для изготовления детали типа «Суппорт» из чугуна

4.1 Анализ алгоритмов конструирования чугунолитейной оснастки

На данный момент разработано большое количество различных САПР, которые поддерживают коллективную работу над проектом. Однако сборочные единицы являются наиболее важным и приоритетным направлением.

Основным преимуществом использования САПР является параметризация. Она позволяет создавать зависимые объекты и сборки, которые будут обновляться при изменении одного или нескольких параметров в любом из модулей, будь то электронная модель, чертеж или исходные параметры. При правильном задании зависимостей все зависимые от изменяемого компонента элементы сборки будут изменяться вместе с ним.

Главным условием создания параметрических связей является соблюдение последовательности наложение этих связей. Требуется исключить возможность циклического отношения между родительской и дочерней деталью.

Рассмотрим циклические зависимости на простом примере (рисунок 4.1). Классическая сборка в виде вала шпонки и втулки создается в следующей последовательности:

- Создается модель вала без шпоночного паза и добавляется в файл сборки;
- Затем добавляем связанное тело вала в файл втулки. И на её основе строим втулку привязывая эскиз к габаритам вала. Так же добавляем в файл сборки;
- Затем уже построенную шпонку с «карманом» добавляем в сборку, и позиционируем её по сопрягаемым поверхностям;

- Добавляем связанное тело «кармана» шпонки в файлы вала и втулки и вычитаем.

При таком создании ассоциативной сборки циклических зависимостей не возникает. На рисунке 4.1 показана схема получения циклических и не циклических зависимостей

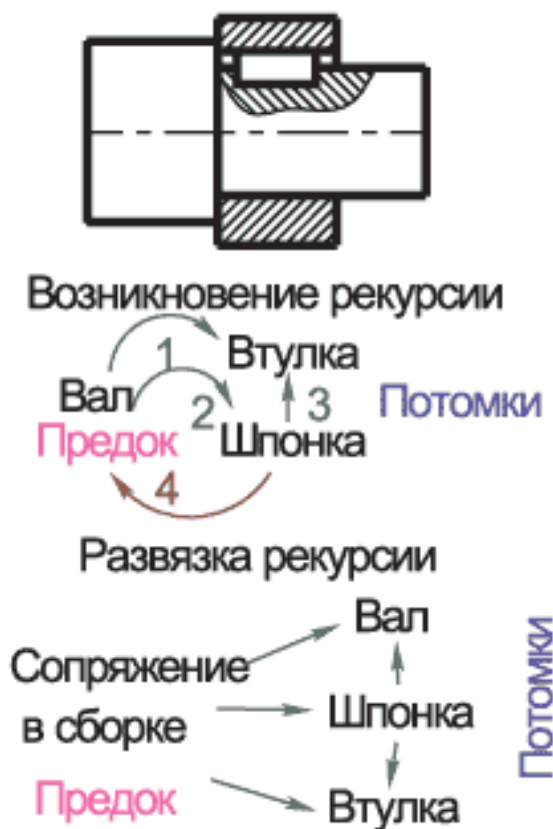


Рисунок 4.1 – Схема предок - потомок

При логичной параметризации сборки и её элементов, изменение одного из элементов повлечет за собой изменение сборки, без потери целостности конструкции.

Существует несколько способов создания сборок основными являются: сборка «снизу-вверх»; «сверху вниз»; комбинированный метод.

При проектировании «Сверху-вниз», детали можно создавать в сборке на основе геометрии других деталей в сборке. Детали редактируются отдельно, независимо от других деталей в сборке, и то, как детали в сборке будут контактировать друг с другом, мы увидим только после завершения

редактирования детали и обновления сборки. При проектировании «Сверху-вниз» сборка определяет габариты, положение и контактирующие элементы входящих в неё деталей и подборок, а значит при проектировании «Сверху-вниз» необходимо обеспечить связь сверху вниз: связь между сборкой и фрагментами сборки. Связь между сборкой и фрагментами сборки осуществляется при помощи ссылочных элементов. Ссылочный элемент заимствует геометрию из сборки в деталь. Ссылочный элемент может заимствовать как основные элементы модели, так и топологические элементы. Контроль связи фрагментов между собой и со сборкой, актуальность исполнения фрагментов.

Принцип проектирования «Сверху-вниз» и механизм работы ссылочных элементов позволяет решить задачи, возникающие при разработке сложных сборок. Например, пользователь может заимствовать геометрию элементов с вышестоящих фрагментов в структуре сборки, либо с фрагментов, расположенных в «параллельных» подборках. Пользователь может в любой момент получить изменения выгруженной геометрии из исходного документа или обновить исходный документ в соответствии с изменениями в выгруженном файле.

При проектировании методом «сверху-вниз» возникает следующий ряд проблем:

- сложность внесения изменений в модель как отдельных элементов, так и в целом сборки;
- более сложная и запутанная организация начального файла по сравнению с методом «снизу-вверх»;
- детали менее удобны при использовании одной 3D модели в различных сборках;
- большие требования по ресурсам компьютера.

Методы проектирования «Сверху-вниз» и «Снизу-вверх» можно сочетать. Метод проектирования «Снизу-вверх» рационально использовать при добавлении в сборку стандартных деталей, деталей со строго заданной

геометрией. Метод проектирования «Сверху-вниз» предпочтительно использовать при проектировании деталей и узлов, обеспечивающих взаимосвязь и закрепление в сборке элементов конструкции, которые имеют строго заданную геометрию.

В случае со сборкой «снизу-вверх» построение электронной модели начинается с отдельных компонентов и сложением их в единое целое. Добавленные в сборочный файл компоненты связываются друг с другом при помощи сопряжений. Данный метод легко организуется, эффективен в проектах типовых сборок и сборок с короткой хронологией.

На данный момент использование библиотек стандартных элементов является неотъемлемой частью проектирования оснастки. Добавление элементов из библиотек, однозначно, происходит по методу «снизу-вверх». Так же не стоит забывать о связанных элементах, которые можно вычлениить из сборки и добавить в отдельный элемент, тем самым получить их последующее точное сопряжение.

Проектирование чугунолитейной оснастки начинается с построения куста. При условии, что проект оригинальный удобнее использовать метод сверху вниз, так как для него нет типовых решений и все элементы будут новыми. Специфика проектирования такова, что на этапе проработки приходится неоднократно вносить изменения в конструкцию и компоновку, что при сборке «снизу-вверх» не удобно. Однако при разработке типовых проектов, как рассматриваемый, где большая часть литниковой системы заимствуется из уже существующих проектов, выгоднее использовать набор стандартных элементов реализуемый при сборке «снизу-вверх», это экономит время, так как не требуется создание новых моделей и чертежей к ним на аналогичные позиции.

4.2 Разработка электронной типовой сборки формы

Разработка электронной модели формы начинается после того как создан и успешно промоделирован "куст". Так как оснастка представляет из себя две модели (верхи и низа), следовательно, для каждой из них требуется построить свою поверхность разъема. Для встречных поверхностей разъема существует правило - зазор 0,2 мм между знаковыми частям (выполняется для избежания обсыпания смеси, при спаривании опок). Зазор для удобства выполняется в одной из моделей. Разъем построен в модели куста и его остается только доработать - добавить в него профиль изделия и зазор 0,2 мм рисунок 4.2. Красным цветом выделены смещенные области. Для охватывающих областей смещение производится в «минус», для охватываемых в «плюс».

Аналогичным образом создается модель для модели верха, создается ассоциативная копия построенного разъема и заменяются только модели (рисунок 4.3).

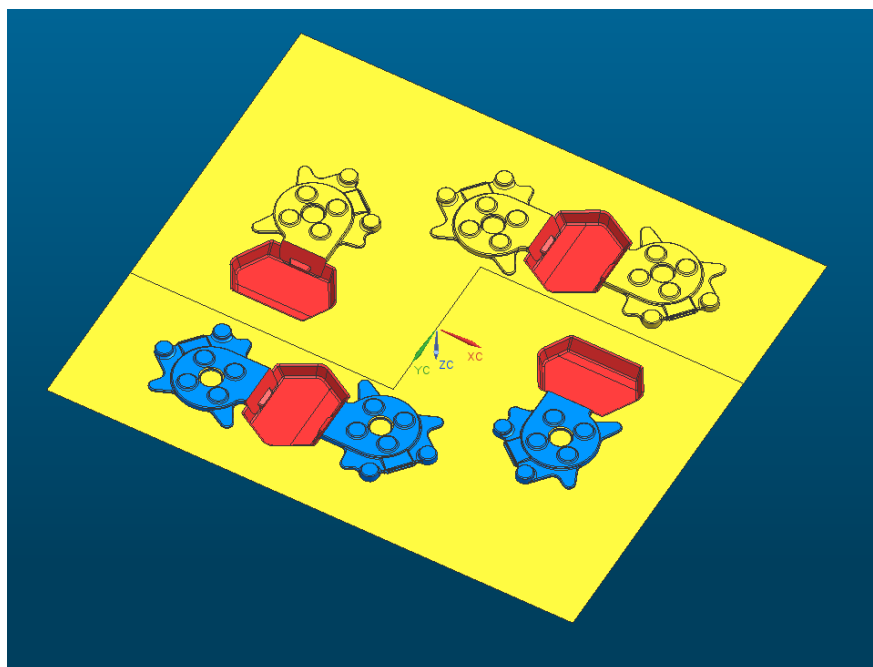


Рисунок 4.2 – Разъем модели низа

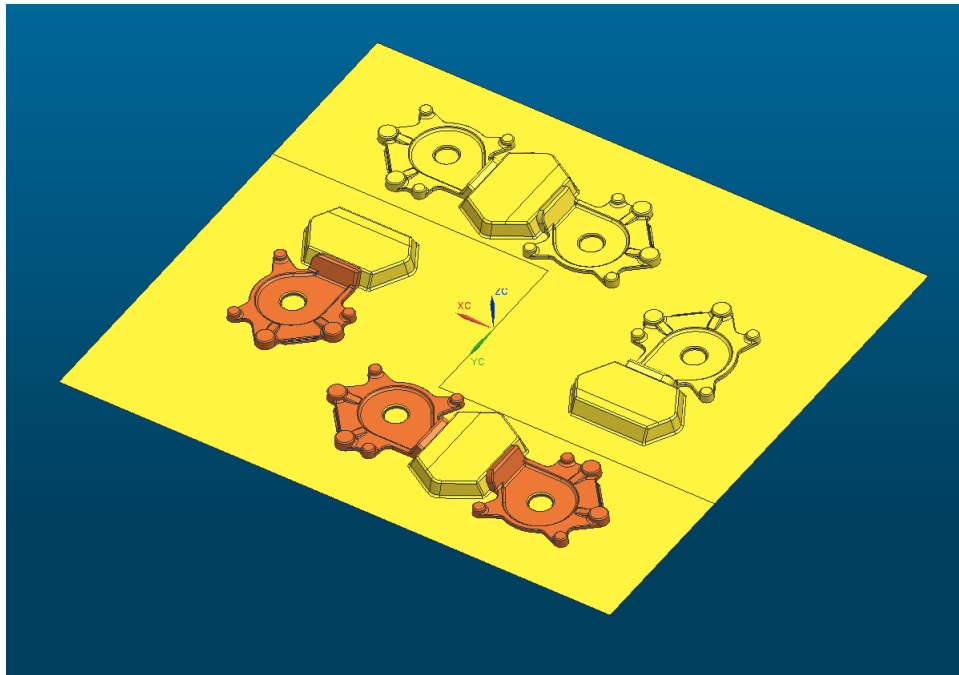


Рисунок 4.3 – Разъем модели низа

Затем связанное тело при помощи приложения WAVE отправляется в файл подмодельной плиты, после чего производим её обрезку по плоскости разъема (рисунок 4.4). Для полуформы верха производятся аналогичные действия. Таким образом, получаем профиль повторяющий плоскость разъема. При внесении изменений в родительскую деталь будут меняться оба разъема и вместе с ними подмодельные плиты.

Связанное тело разъема добавляется в скрытый ссылочный набор, для создания сборки.

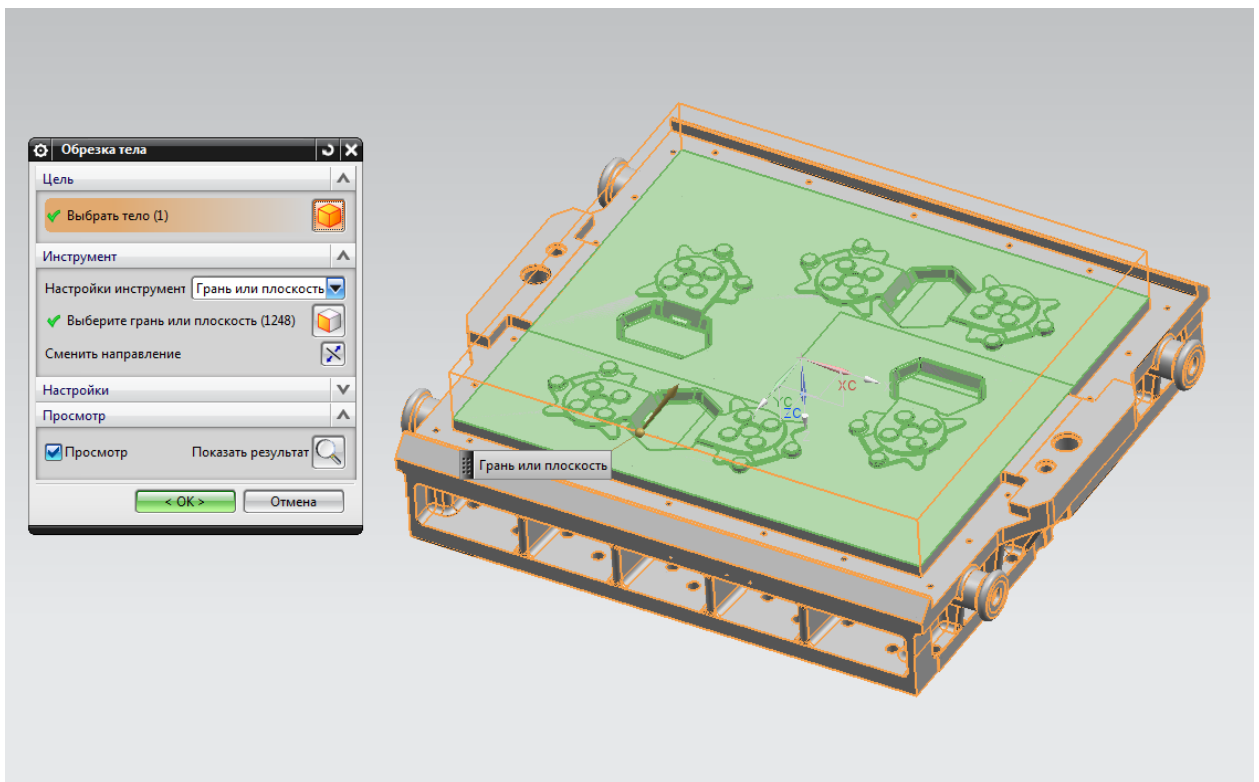


Рисунок 4.4 – Обрезка подмодельной плиты низа

После плиты создаем вставки, которые будут в нее устанавливаться. Вставками оформляются все выступающие над плоскостью плиты элементы. Рассмотрим алгоритм их создания на примере модели.

В файл модели так же, как и в файл плиты подгружается связанное тело разъема, затем эскизом создается контур будущей вставки вытягивается и обрезается (рисунок 4.5). Так же аналогичным образом создается карман изделия, который отличается лишь отсутствием обрезки по верху и фаской по низу. Карман оформляет посадочное место под вставку. Таким образом получаем полностью ассоциативную вставку и карман, которые будут изменяться вместе с другими элементами оснастки.

Аналогичные действия производятся с моделью верха и вставками верха, оформляющими разъем.

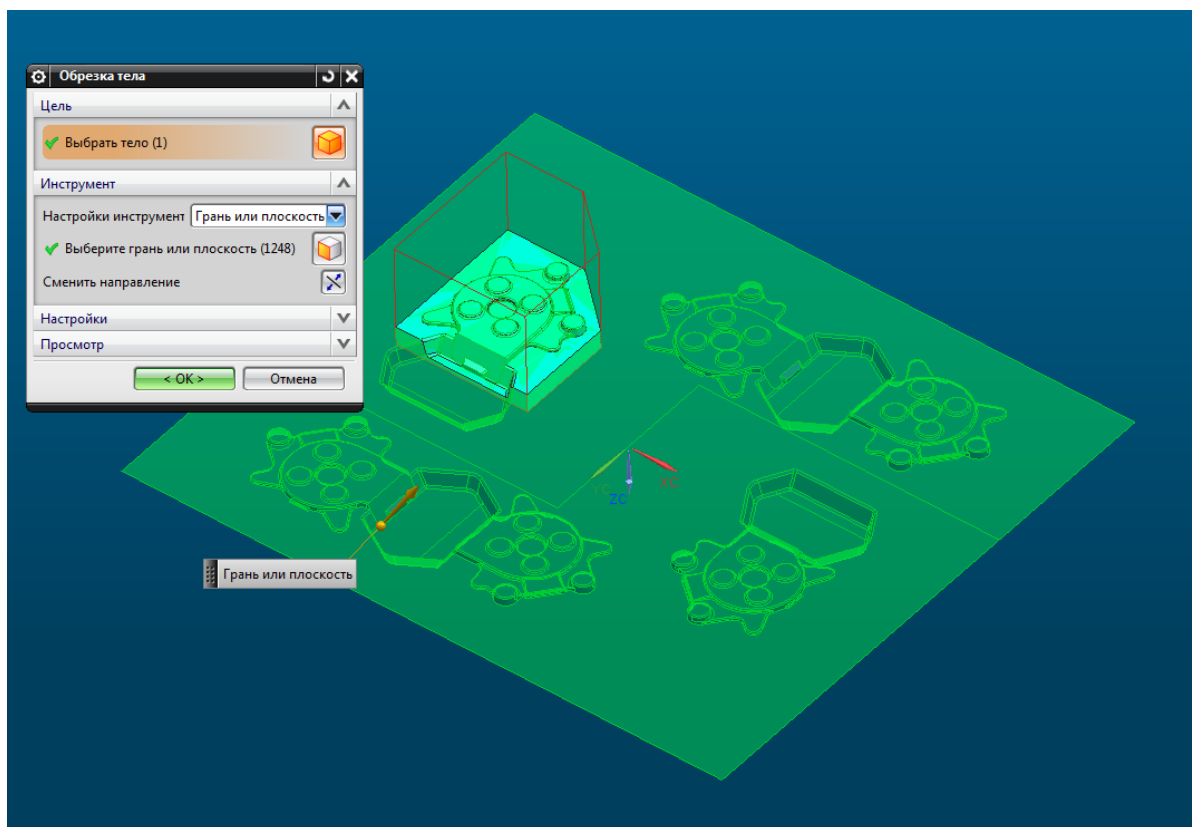


Рисунок 4.5 – Обрезка модели

Когда модели вставок созданы, можно приступать к сборке формы. Создается сборочный файл в который добавляется модель плиты. Затем включаем ссылочный набор с моделью разъема и осуществляем привязки вставок к нему, так как после вычитания карманов ссылочная геометрия исчезнет и связи нарушаться. Затем по привязкам устанавливаются прибыли, элементы литниковой системы, крепеж (рисунок 4.6).

После сборки модели, заменяем ссылочные наборы на «Карман» во всех элементах где это возможно (крепеж, вставки, оптическая база) и отправляем ссылочные тела в файл плиты (рисунок 4.7).

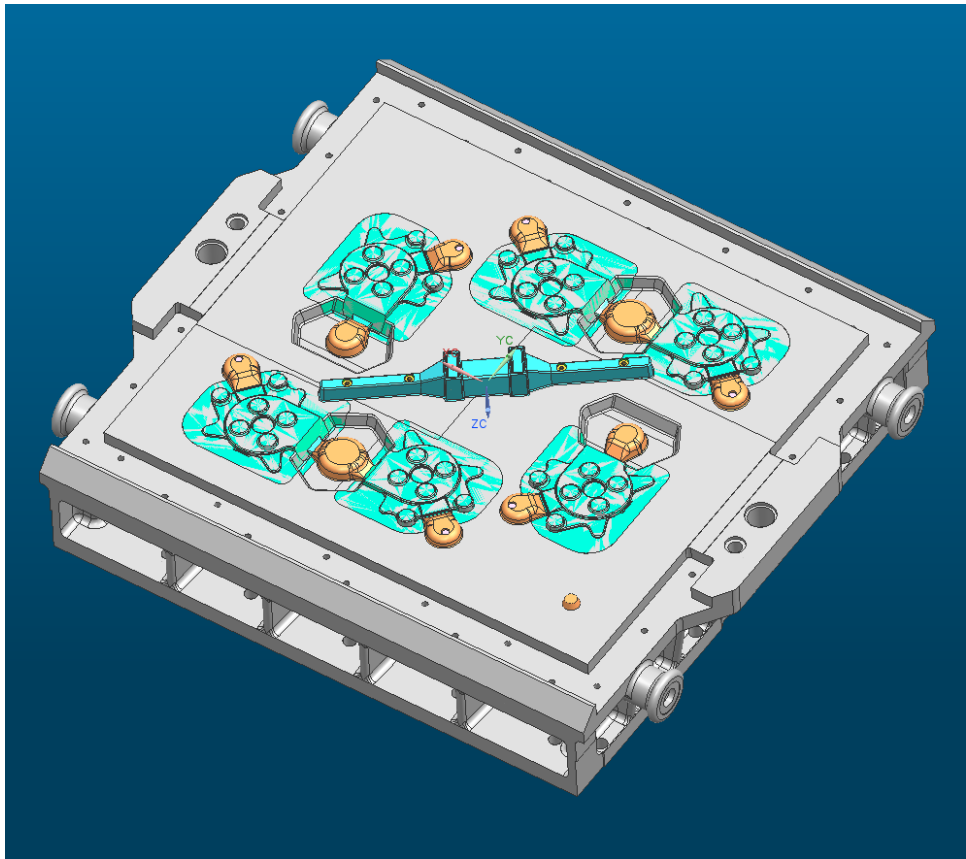


Рисунок 4.6 – Модель низа в сборе

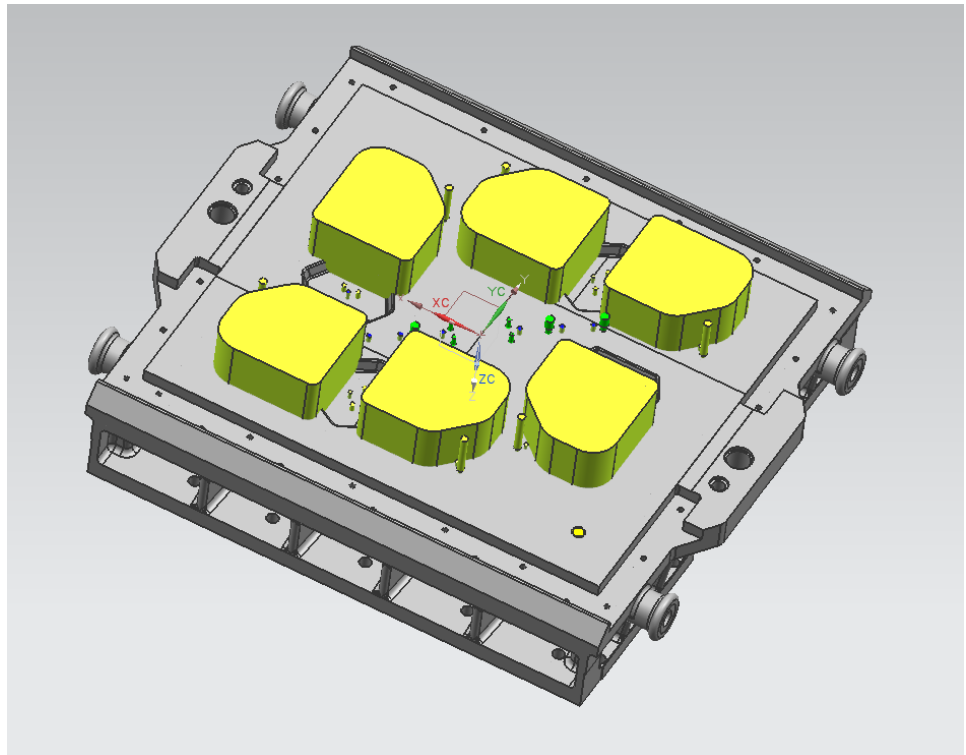


Рисунок 4.7 – Модель плиты с карманами

Далее остается вычистить карманы из плиты, на этом проектирование сборки заканчивается. Аналогичные действия выполняются с моделью верха.

4.3 Создание банка данных параметризованных типовых элементов формы

Все элементы оснастки делятся на три условные группы:

- 1) Непараметризуемые элементы - оригинальные компоненты, уникальные для каждого проекта, например: модельные вставки; вставки, повторяющие разъем.
- 2) Стандартные элементы - компоненты оснастки, являющиеся стандартными, применяемые во всех проектах без каких-либо изменений.
- 3) Параметризуемые элементы - типовые компоненты оснастки, повторяющиеся во всех или части проектов, с различными типоразмерами, например.

Банк данных включает в себя элементы второй и третьей группы. Элементы, устанавливаемые в тело подмодельной плиты имеют, в скрытых ссылочных наборах, так называемые карманы. Карман - твердое тело, повторяющее геометрию установочных отверстий и выборок. После добавления детали к сборке связанное тело кармана добавляется к телу, в которое устанавливается деталь. Таким образом, при изменении положения тела в пространстве карман будет так же менять свое расположение. Такой способ позволяет быстро редактировать сборку, не внося изменения в каждую деталь по отдельности.

Стандартные элементы включают следующие позиции:

- 1) Стояк (рисунок 4.8).
- 2) Основание стояка (рисунок 4.9).
- 3) Подмодельная плита верха (рисунок 4.10).
- 4) Подмодельная плита низа (рисунок 4.11).

5) Металлоприемник (часть, располагаемая в полуформе верха) (рисунок 4.12).

6) Конструктивная база низа. Выполнена в виде подборки в которую включены винт и шайба, так же в дополнительном ссылочном наборе находится карман, выполняющий отверстие под винт и посадочное место по базу (рисунок 4.13).

7) Конструктивная база верха. Выполнена по аналогии с базой низа. В ней так же присутствует подборка с винтом и карман оформляющий посадочное место (рисунок 4.14).

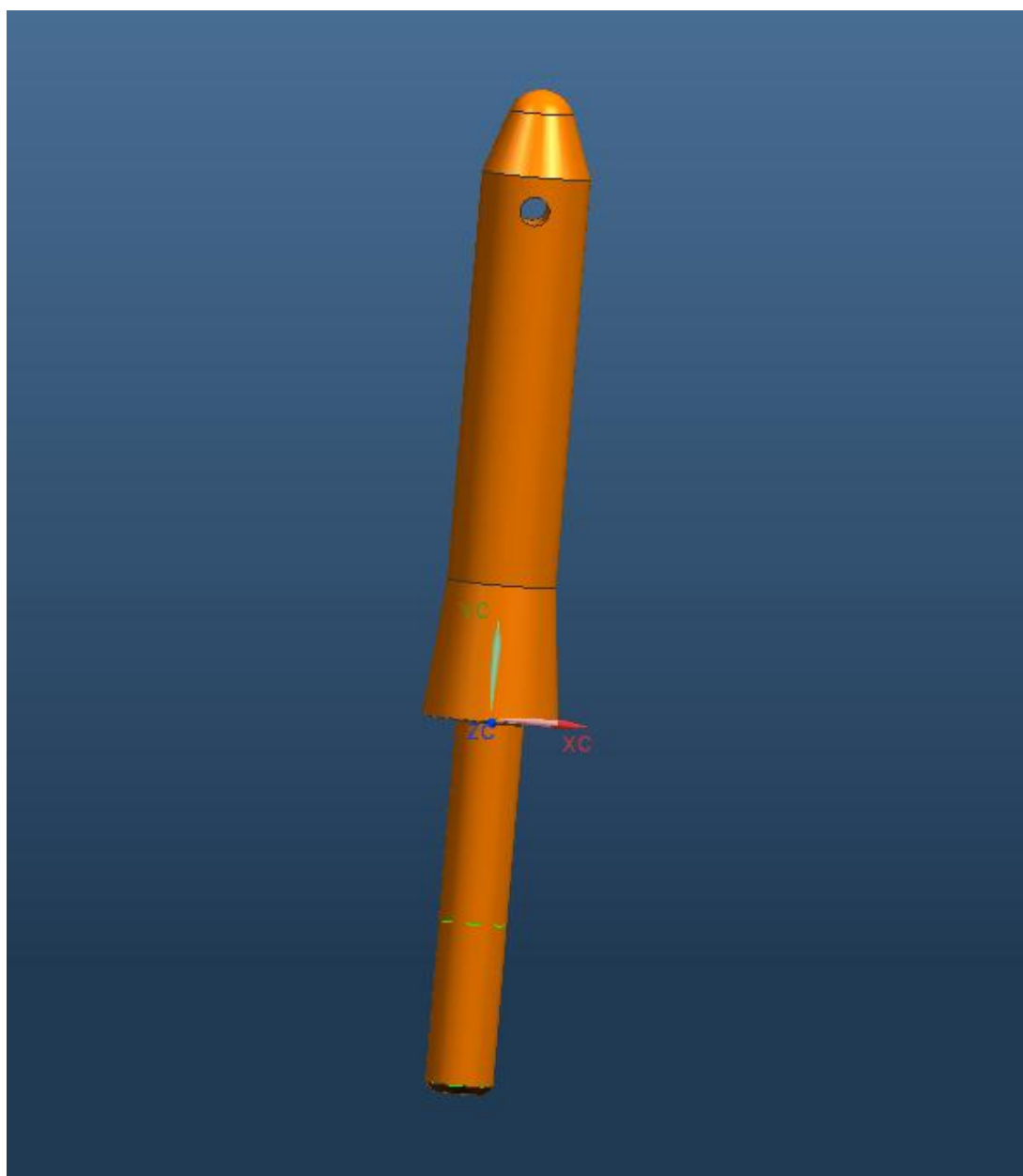


Рисунок 4.8– Модель стояка

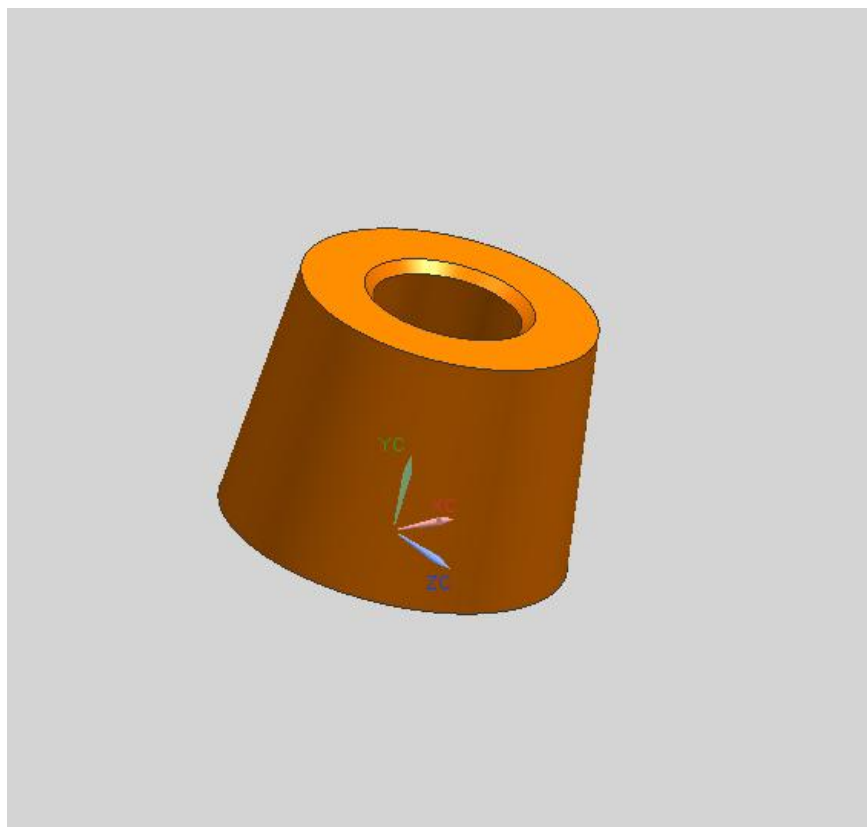


Рисунок 4.9 – Модель основания стояка

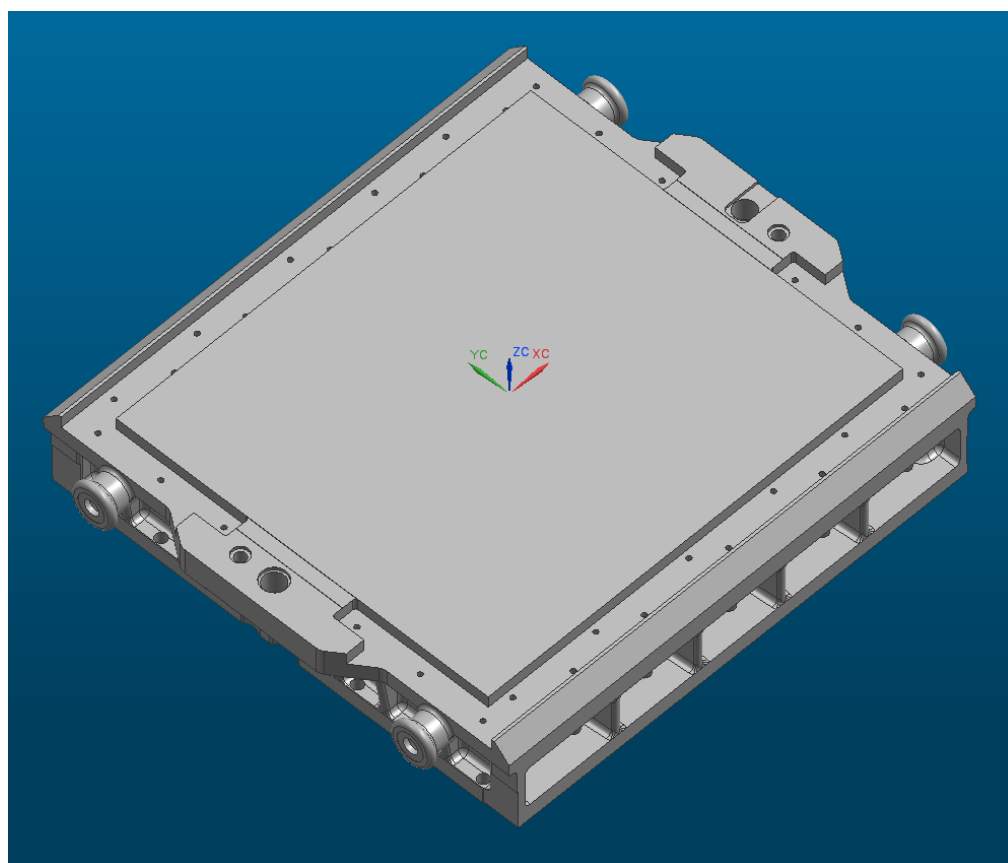


Рисунок 4.10 – Модель подмодельной плиты верха

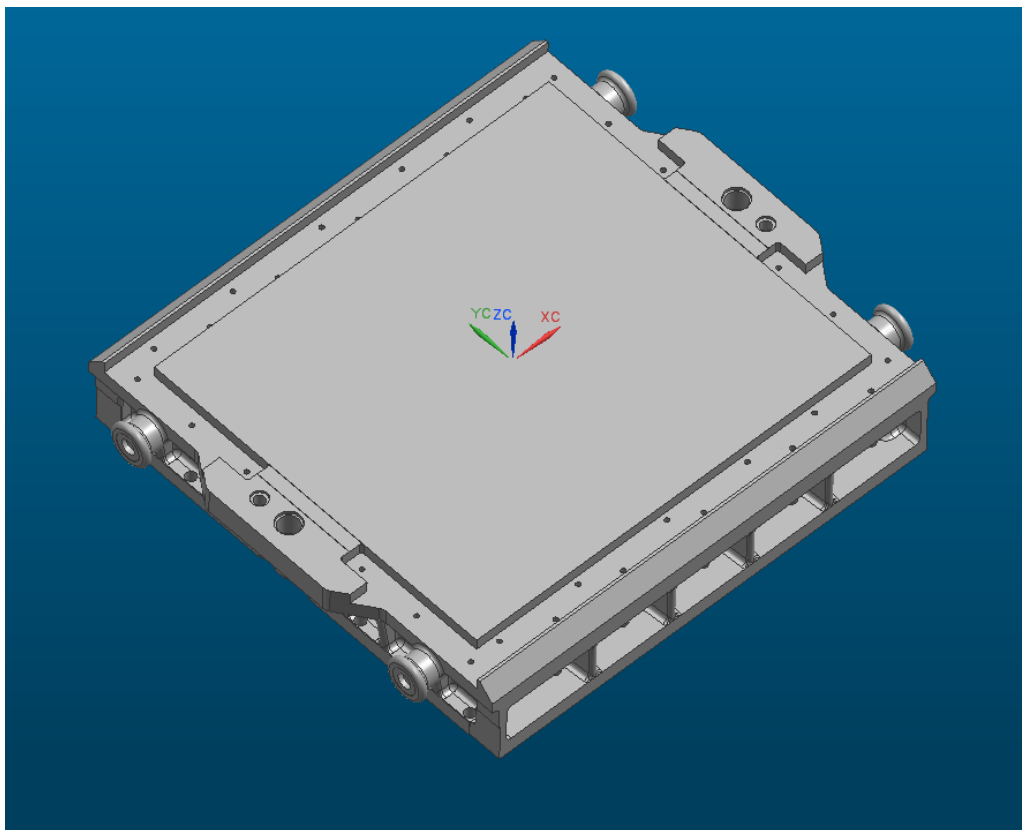


Рисунок 4.11 – Модель подмодельной плиты низа

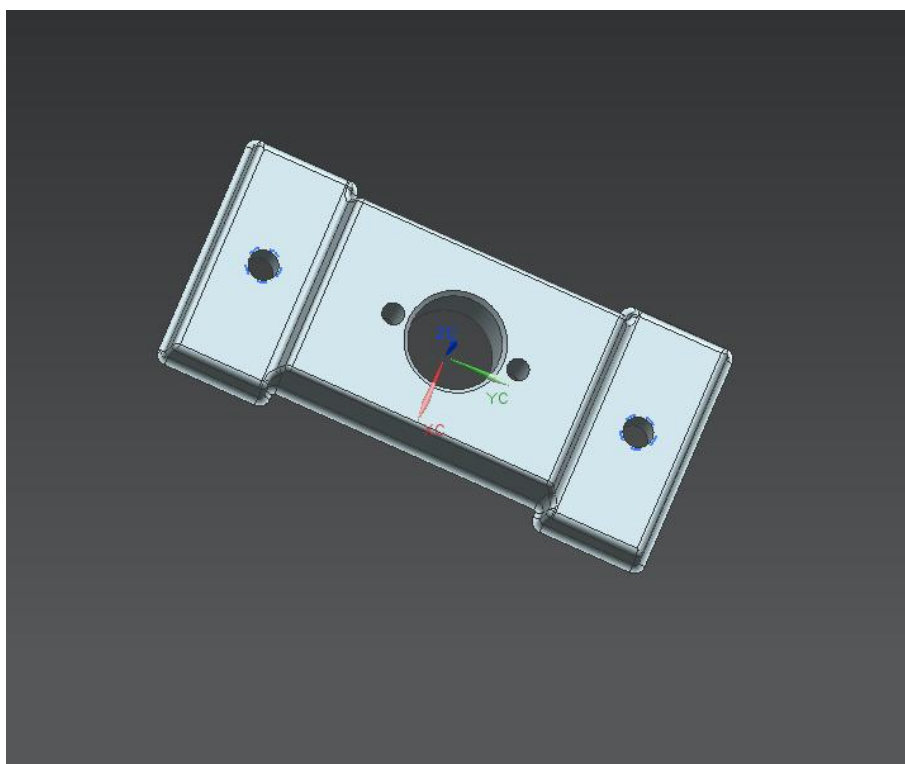


Рисунок 4.12 – Модель металлоприемника

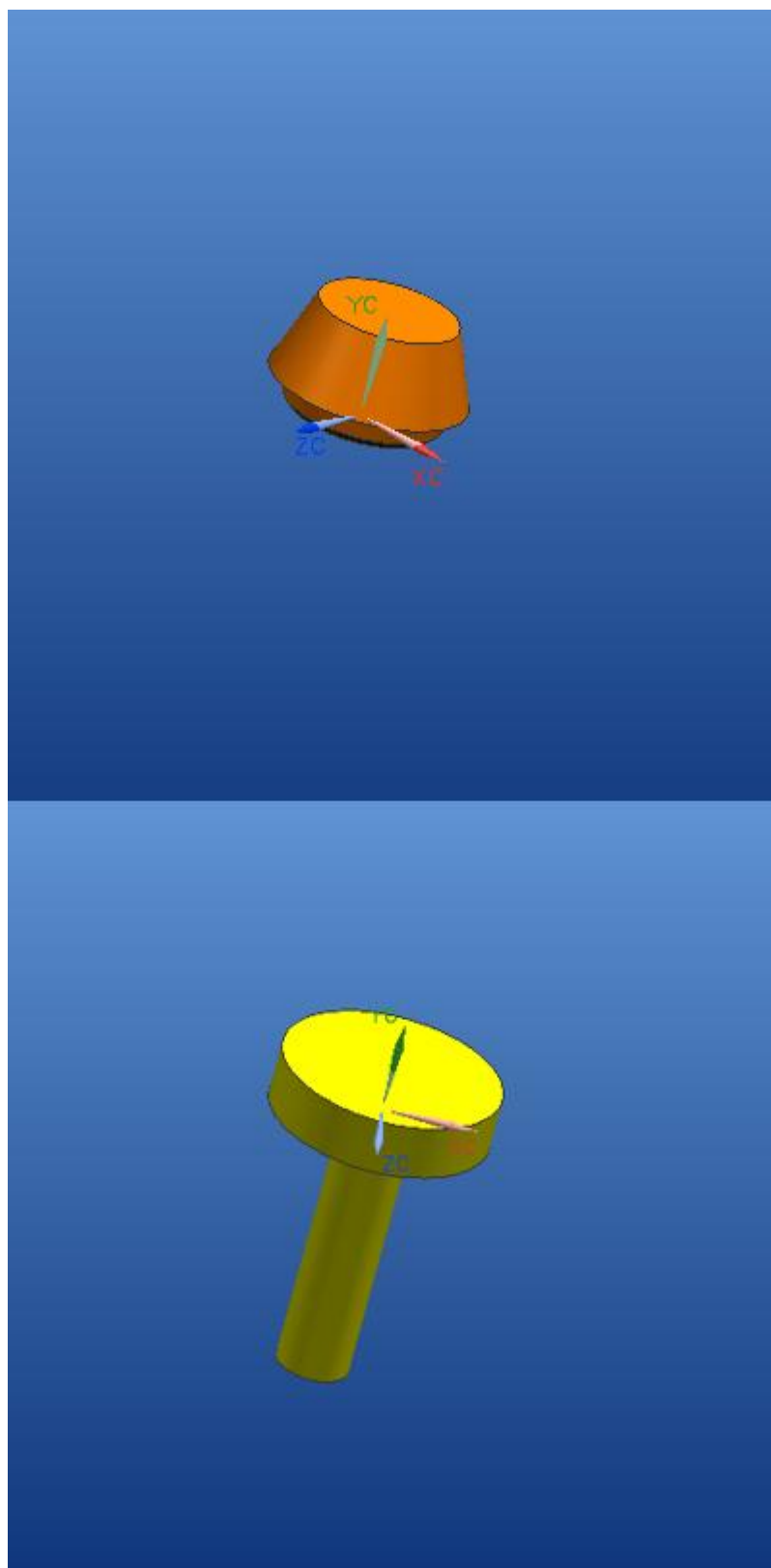


Рисунок 4.13 – Модель конструктивной базы низа

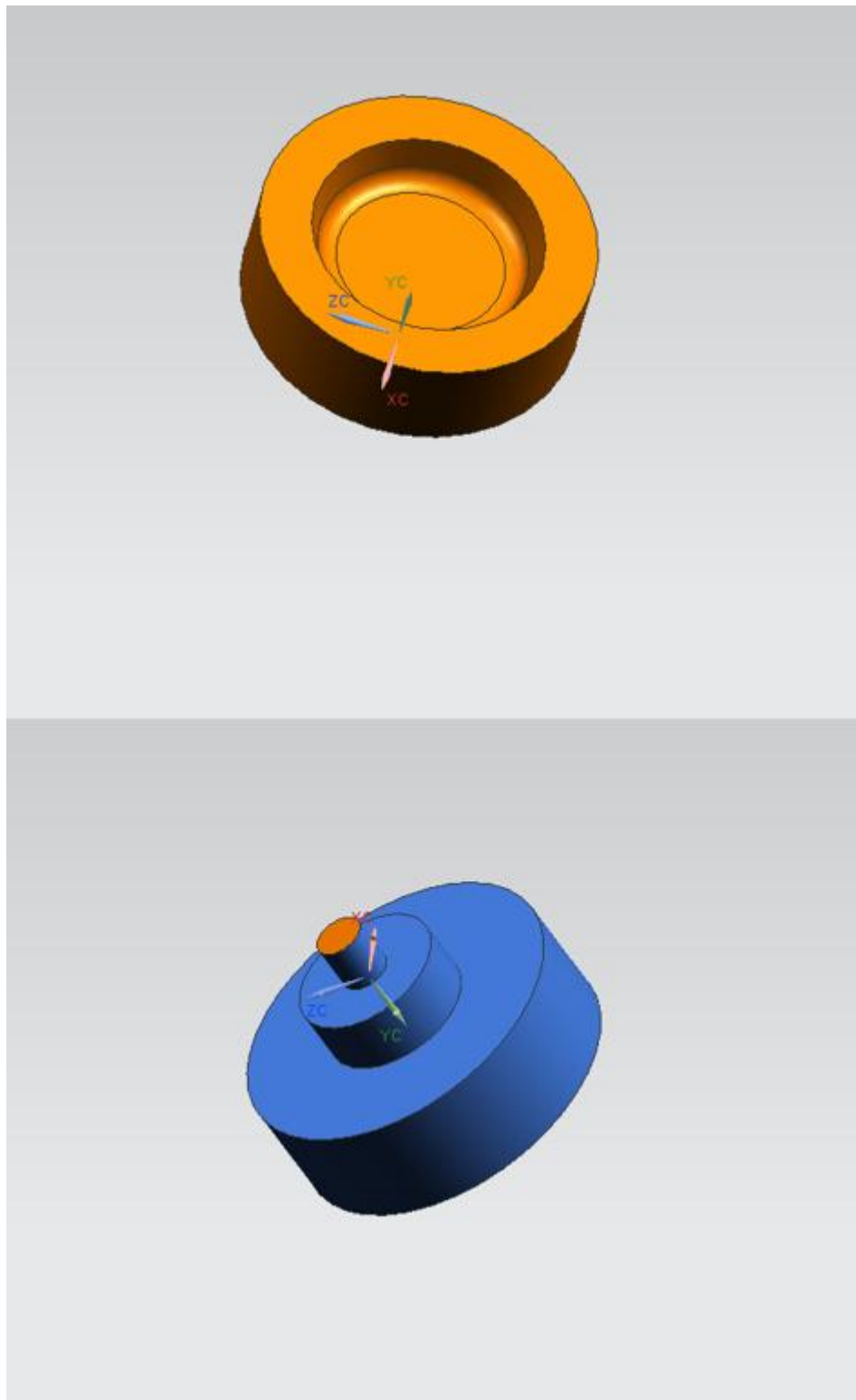


Рисунок 4.14 – Модель оптической базы

Параметризация элементов оснастки реализована через функцию «Семейство деталей». Такие детали представляют из себя обычную электронную модель изделия у которой ключевые размеры заменены на параметры. Эти параметры выражены в таблице excel и каждый из них имеет свой набор значений. Таким образом деталь, созданная в «семействе деталей» представляет из себя набор различных типоразмеров одной детали, например, винт с набором различных длин и диаметров, согласно госту.

Рассмотрим алгоритм создания семейства деталей на примере стандартного винта. Для начала необходимо создать параметризованную модель детали (рисунок 4.15), после чего открыть меню «Семейства деталей» и добавить в поле «выбранные столбцы» требуемые параметры. Вкладка выражения позволяют параметризовать конкретное значение одного из элементов, например, высота вытягивания или диаметр окружности в эскизе. Вкладка элементы позволяет включать и отключать определенные элементы, например, наличие дополнительных крепежных отверстий на длинных деталях. На рисунке 4.16 показано поле выбора добавляемых в таблицу параметров.



Рисунок 4.15 – Меню семейства деталей

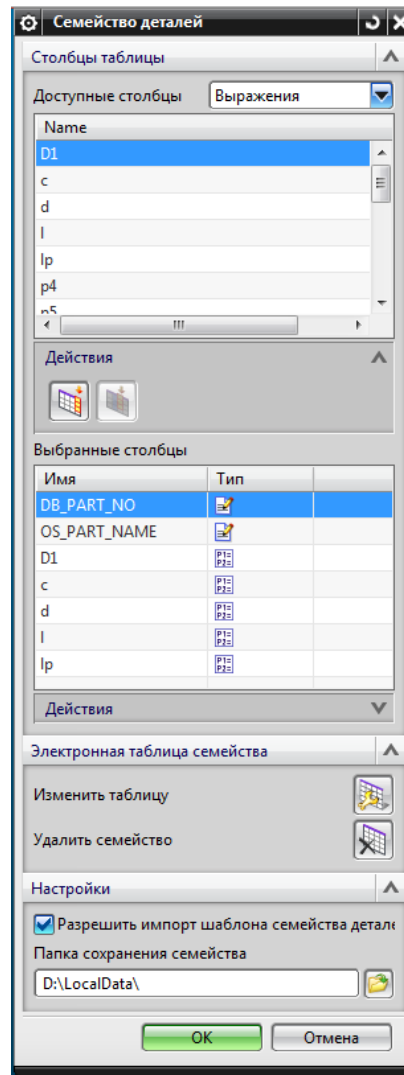


Рисунок 4.16 – Меню семейства деталей

После того как все параметры выбраны, при нажатии кнопки «Создать таблицу», будет создан Excel-файл с соответствующими столбцами. Остается лишь задать параметры для каждого наименования. Столбцы OS_PART_NAME и DB_PART_NO заполняются, они обозначают имя варианта изделия присваиваемое ему при добавлении в сборку и имя для PDM системы, соответственно. После задания желаемых параметров, на вкладке для управления семейством деталей будут отражены следующие функции:

- проверка детали: применяет параметры выбранной строки к изделию, эта функция позволяет проверить наличие ошибок параметризации.

- сохранить семейство: сохраняет созданную таблицу для текущего элемента.

- обновить детали: производит обновление всех членов семейства.

Пример заполнения таблицы представлен на рисунке 4.17.

The screenshot shows an Excel spreadsheet with a table of part family data. The table has columns for part number, name, and various dimensions. To the right, a CAD software interface is visible, showing a model history tree with various features like 'Эскиз (1) "SKETCH_000"', 'Вращение (2)', 'Упрощенная резьба (3)', 'Фаска (4)', 'Вытягивание (6)', 'Вытягивание (7)', and 'Конус (8)'. The 'Зависимости' (Dependencies) section is also visible, showing a table with columns for 'Параметр', 'Значение', and 'Выраже...'.

DB_PART_NO	OS_PART_NAME	D1	c	d	l	lp	
M5x10	Vint M5x10	8,50	1	5	10	22	
M5x12	Vint M5x12	8,50	1	5	12	22	
M5x14	Vint M5x14	8,50	1	5	14	22	
M5x16	Vint M5x16	8,50	1	5	16	22	
M5x20	Vint M5x20	8,50	1	5	20	22	
M5x25	Vint M5x25	8,50	1	5	25	22	
M5x30	Vint M5x30	8,50	1	5	30	22	
M5x35	Vint M5x35	8,50	1	5	35	22	
M5x40	Vint M5x40	8,50	1	5	40	22	
M5x45	Vint M5x45	8,50	1	5	45	22	
M5x50	Vint M5x50	8,50	1	5	50	22	
M6x10	Vint M6x10	10,00	1	6	10	24	
M6x12	Vint M6x12	10,00	1	6	12	24	
M6x14	Vint M6x14	10,00	1	6	14	24	
M6x16	Vint M6x16	10,00	1	6	16	24	
M6x20	Vint M6x20	10,00	1	6	20	24	
M6x25	Vint M6x25	10,00	1	6	25	24	
M6x30	Vint M6x30	10,00	1	6	30	24	
M6x35	Vint M6x35	10,00	1	6	35	24	
M6x40	Vint M6x40	10,00	1	6	40	24	
M6x45	Vint M6x45	10,00	1	6	45	24	
M6x50	Vint M6x50	10,00	1	6	50	24	
M6x55	Vint M6x55	10,00	1	6	55	24	
M6x60	Vint M6x60	10,00	1	6	60	24	
M8x12	Vint M8x12	13,00	1,6	8	12	28	
M8x14	Vint M8x14	13,00	1,6	8	14	28	
M8x16	Vint M8x16	13,00	1,6	8	16	28	
M8x20	Vint M8x20	13,00	1,6	8	20	28	
M8x25	Vint M8x25	13,00	1,6	8	25	28	
M8x30	Vint M8x30	13,00	1,6	8	30	28	
M8x35	Vint M8x35	13,00	1,6	8	35	28	
M8x40	Vint M8x40	13,00	1,6	8	40	28	
M8x45	Vint M8x45	13,00	1,6	8	45	28	

Рисунок 4.17 – Таблица семейства деталей

Параметризованные элементы включают следующие позиции:

1) Обжимной бурт прямой. Изменяемым параметром является длина бурта и наличие отверстия в середине. Дополнительное отверстие появляется в конфигурации при длине бурте более 200мм включительно. Так же в данной детали реализован «карман». Таблица параметров и модели бурта и его «кармана» представлены на рисунках 4.18 и 4.19.

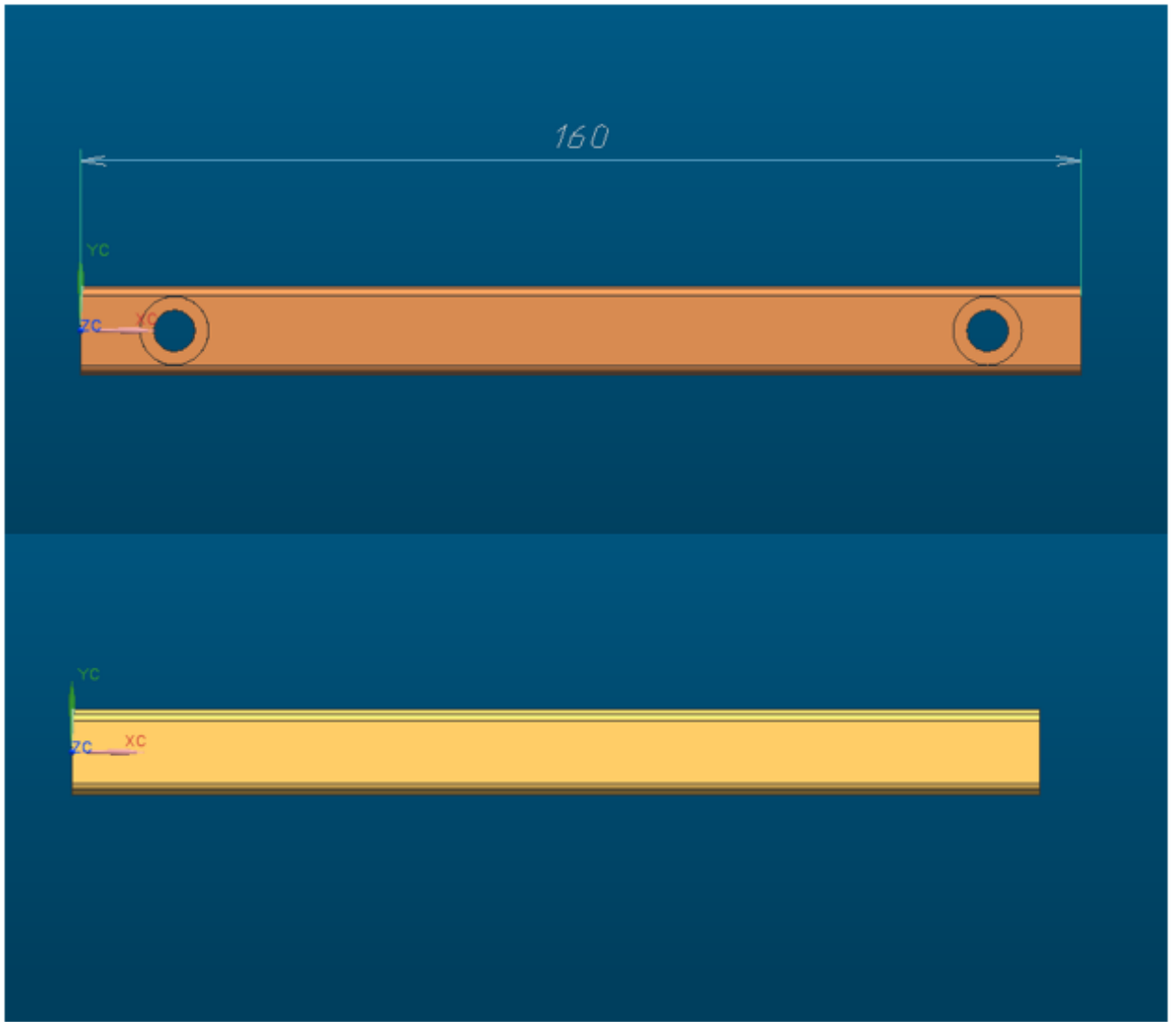


Рисунок 4.18 – Модель обжимного бурта и его кармана

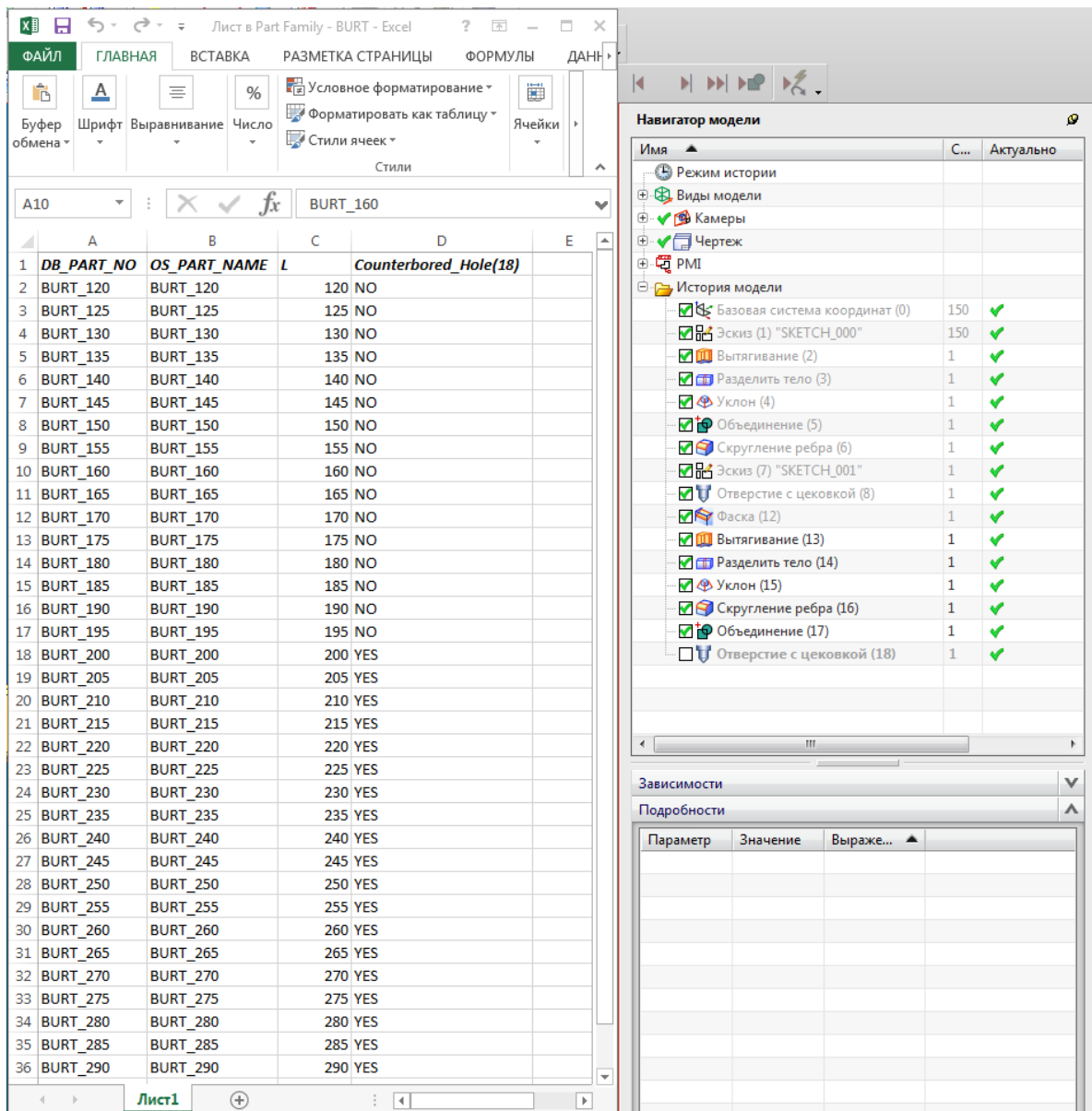


Рисунок 4.19 – Параметры обжимного бурта

2) Обжимной бурт угловой. Изменяемый параметр габаритные размеры в двух направлениях указанные на рисунке 4.20. Так данной детали так же реализовано дополнительное отверстие, активируемое при габаритах более 100мм (рисунок 4.21) и «карман».

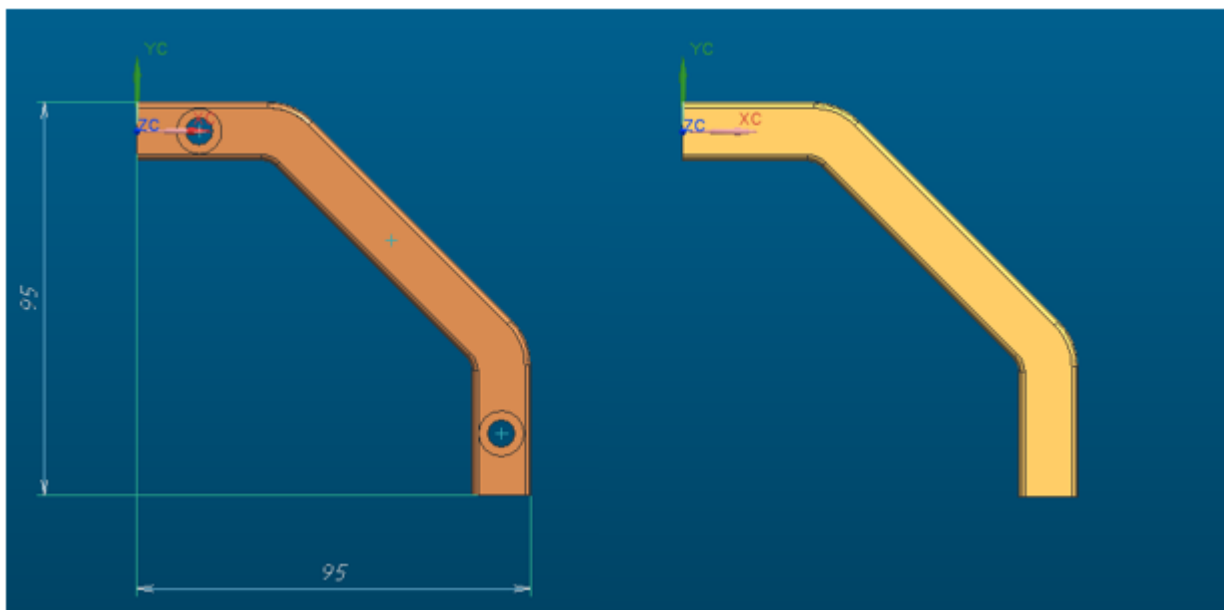


Рисунок 4.20 – Обжимной бурт угловой с карманом

The screenshot displays a CAD software interface with a data table and a model history panel. The data table is as follows:

	A	B	C	D
1	DB_PART_NO	OS_PART_NAME	L	Counterbored_Hole(22)
2	70	70	70	NO
3	75	75	75	NO
4	80	80	80	NO
5	85	85	85	NO
6	90	90	90	NO
7	95	95	95	NO
8	100	100	100	YES
9	105	105	105	YES
10	110	110	110	YES
11	115	115	115	YES
12	120	120	120	YES
13	125	125	125	YES
14	130	130	130	YES
15	135	135	135	YES
16	140	140	140	YES
17	145	145	145	YES
18	150	150	150	YES
19	155	155	155	YES
20	160	160	160	YES
21	165	165	165	YES
22	170	170	170	YES
23	175	175	175	YES
24	180	180	180	YES
25	185	185	185	YES
26	190	190	190	YES
27	195	195	195	YES
28	200	200	200	YES
29	205	205	205	YES
30	210	210	210	YES
31	215	215	215	YES
32	220	220	220	YES
33	225	225	225	YES
34	230	230	230	YES
35	235	235	235	YES
36	240	240	240	YES

The model history panel on the right shows the following steps:

- Базовая система координат (0) 150 ✓
- Эскиз (1) "SKETCH_000" 150 ✓
- Вытягивание (2) 1 ✓
- Разделить тело (3) 1 ✓
- Уклон (4) 1 ✓
- Объединение (5) 1 ✓
- Скругление ребра (6) 1 ✓
- Скругление ребра (7) 1 ✓
- Эскиз (8) "SKETCH_001" 1 ✓
- Отверстие с цевковкой (9) 1 ✓
- Скругление ребра (13) 1 ✓
- Фаска (14) 1 ✓
- Вытягивание (15) 1 ✓
- Разделить тело (16) 1 ✓
- Уклон (17) 1 ✓
- Объединение (18) 1 ✓
- Скругление ребра (19) 1 ✓
- Скругление ребра (20) 1 ✓
- Скругление ребра (21) 1 ✓
- Отверстие с цевковкой (22) 1 ✓

Рисунок 4.21 – Параметры обжимного бурта углового

3) Центральный литник. Изменяемыми параметрами выступают высота ширина и длина, которые приведены на рисунке 4.22. Для проходного сечения в таблице сразу выводится площадь, это упрощает расчет литниковой системы.

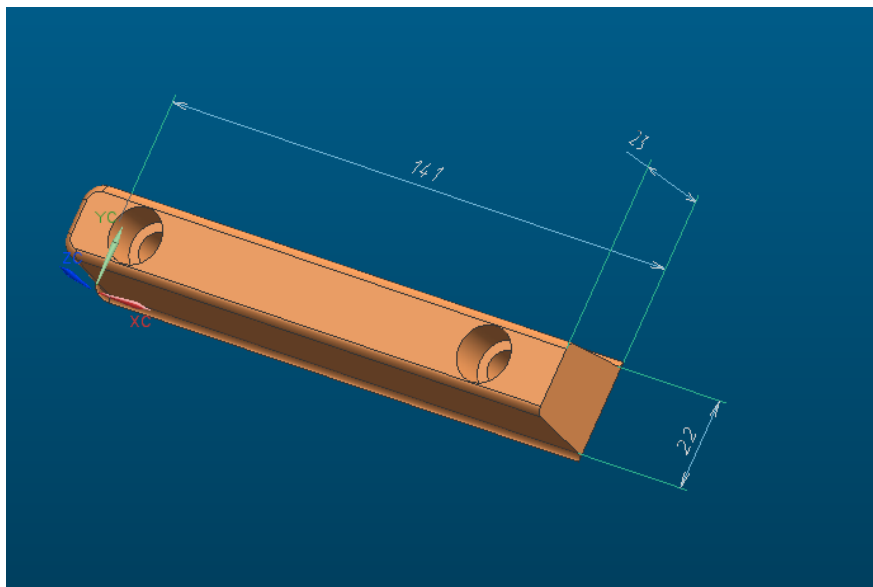


Рисунок 4.22 – Центральный литник

4) Металлоприемник. Для данной детали изменяемыми параметрами выступают высота и ширина проходного сечения (рисунок 4.23)

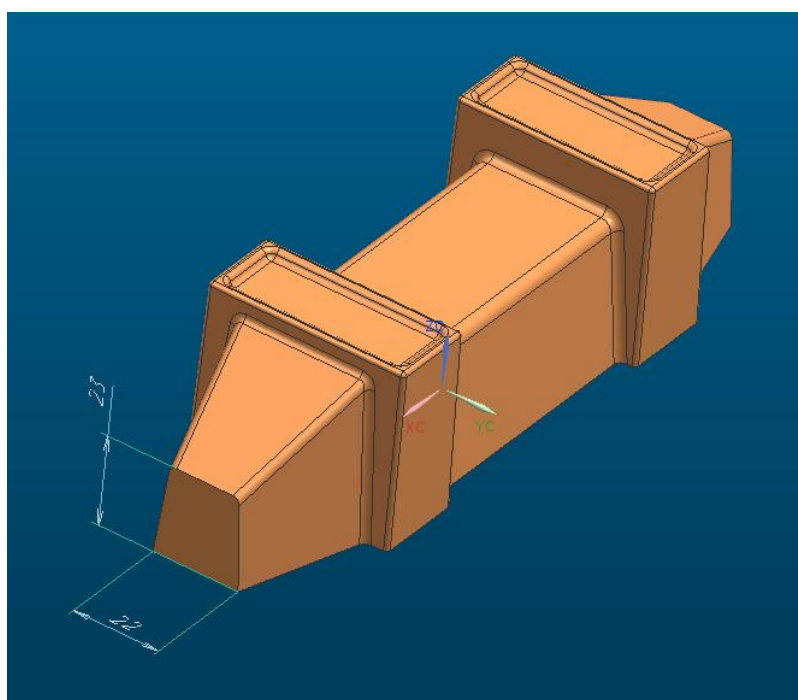


Рисунок 4.23 – Металлоприемник

5) Прибыль. Все прибыли в оснастке выполнены по одному принципу. Деталь представляет из себя две части, размещаемые в различных полуформах. Для удобства использования сформировано три ссылочных набора, в которых по отдельности находятся прибыль целиком, верхняя часть прибыли и нижняя часть прибыли. В полуформе верха прибыль имеет большую высоту, чем полуформе низа. Изменяемые параметры представлены высотой каждой части прибыли и их диаметром рисунок 4.24 и 4.25

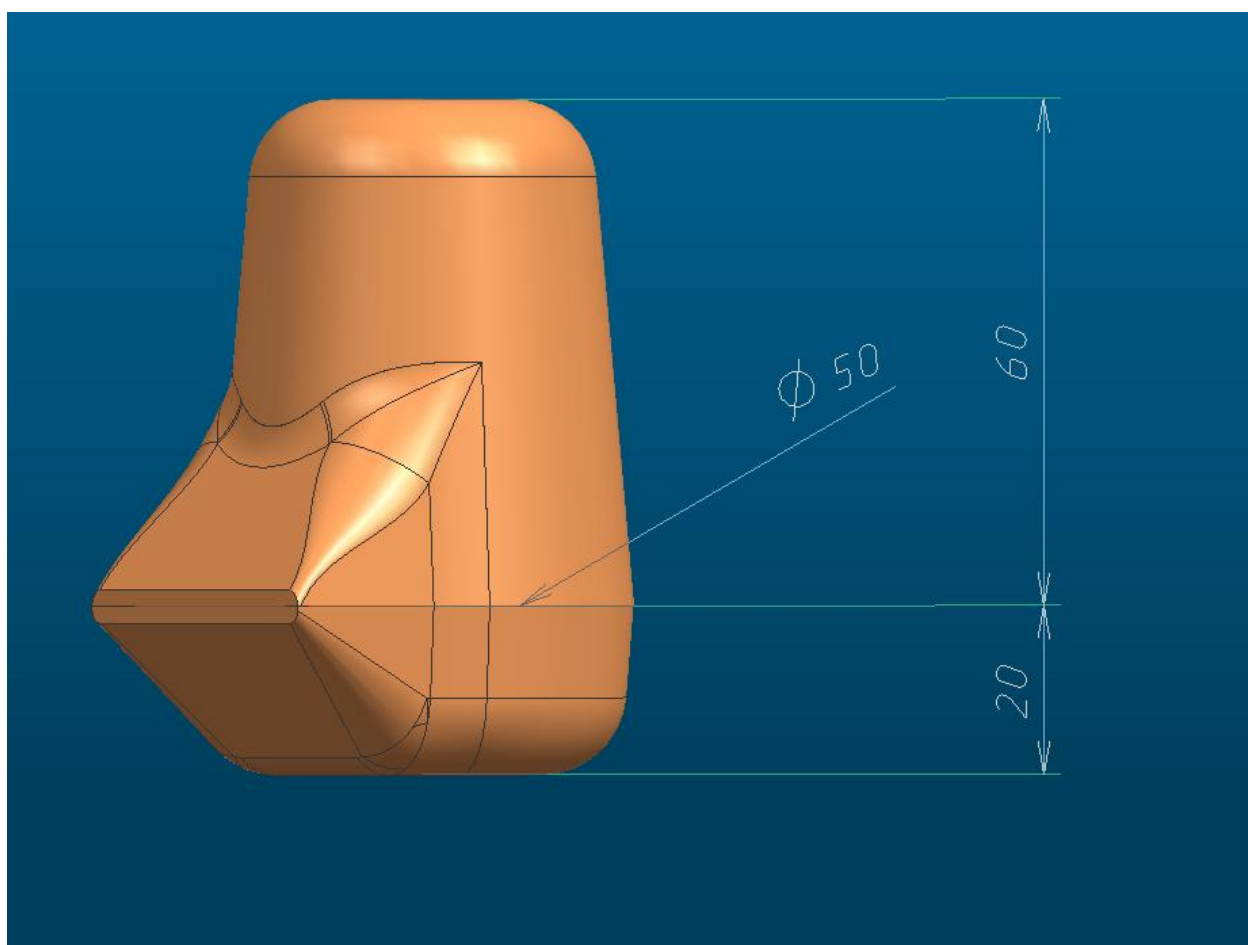


Рисунок 4.24 – Прибыль

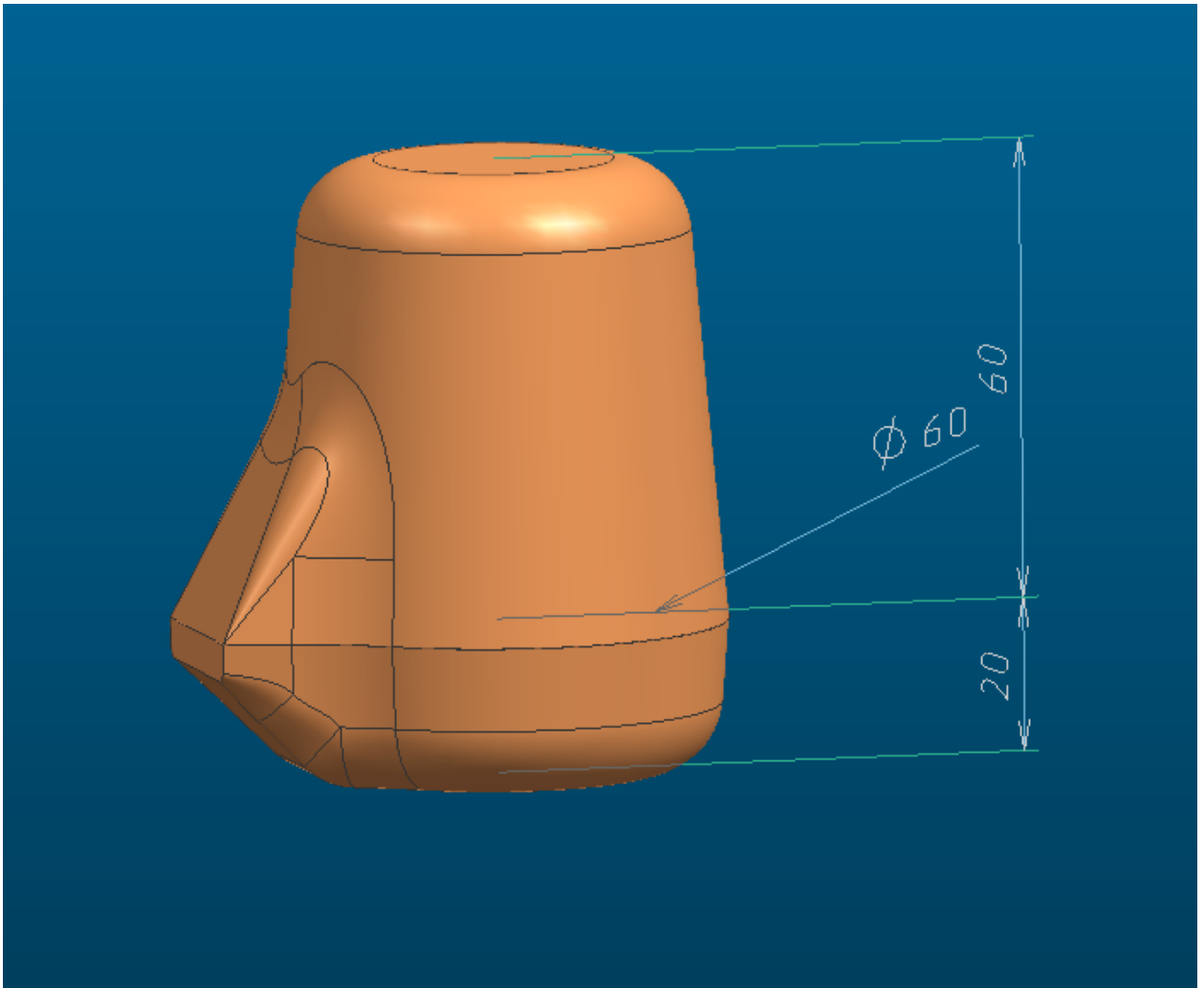


Рисунок 4.25 – Прибыль

4.4 Описание процедуры ускоренного проектирования литьевых форм в САПР

Методика ускоренного проектирования заключается в симбиозе последовательности действий, изложенных ранее и применения базы стандартных и параметризованных элементов.

Базу стандартных элементов удобнее использовать для аналогичных проектов, например, деталь «Кронштейн крепления заднего тормоза» применяется на нескольких автомобилях, и для каждого автомобиля в нескольких различных модификациях. Таким образом имеем схожие детали с небольшими отличиями в виде измененной линии разреза, наличия

дополнительных бобышек. Такие различия не накладывают изменения на конфигурацию литниковой системы, так как общая форма детали и места подвода прибылей остаются неизменными, однако из-за конструктивных особенностей может изменяться объем прибылей и диаметры литников.

Проектирование начинается с построения куста и добавления в него параметризованных элементов литниковой системы аналогично существующему проекту. После чего производится моделирование процесса литья, на основании результатов которого вносятся коррективы в параметры литниковой системы. Изменяется объем прибылей и проходные сечения литниковой системы. Эти действия совершаются через функцию семейства деталей, в открывшемся Excel файле вносятся новые параметры для каждого элемента. Далее проводится повторное моделирование процесса для уточнения результатов изменений.

Преимущество метода в том, что приступать к проектированию оснастки можно непосредственно после создания куста, не дожидаясь результатов моделирования. Электронные модели отдельных элементов куста, точно так же устанавливаются в сборку оснастки и при изменении математической модели в кусте, обновляются и в оснастке. Таким образом повышается не только качество проектирования, но и его скорость и к завершающему этапу моделирования оснастка может быть уже готова.

Точно так же и в жизненном цикле проекта, при изменении техпроцесса и требования доработки оснастки, будет легко изменить параметры литниковой системы, с сохранением ассоциативности.

Такая методика и базы элементов могут быть применены к любым деталям с типовой литниковой системой. Создание базы занимает мало времени в сравнении с тем сколько его можно сэкономить в будущем.

4.5 Выводы

1. Произведен анализ различных алгоритмов конструирования оснастки. Алгоритм проектирования «Снизу вверх» является наиболее удобным для текущих задач.
2. Разработана электронная модель формы. Разработаны типовые решения ассоциативного проектирования.
3. Произведена классификация элементов чугунолитейной оснастки, выделены стандартные и подлежащие параметризации элементы. Создан банк данных таких элементов.
4. Описана методика проектирования оснастки с применением стандартных элементов и алгоритма создания сборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана технологии литья в песчаную форму детали «Кронштейн крепления заднего тормоза». Рассмотрены типы литеных форм, материалы формовочных смесей. Определен материал отливки и его характеристики, согласно которым подобраны параметры заливки.

2. Проведено моделирование процесса литья в песчаную форму детали «Кронштейн крепления заднего тормоза». Промоделировано три варианта «куста» литниковой системы. На основании результатов подобрана оптимальная конфигурация литниковой системы сочетающая качество получаемых отливок и экономию металла.

3. Установлены технологические параметры рациональных размеров литьевой формы. Описан процесс проектирования оснастки и её элементов.

4. Создана база типовых элементов литьевой оснастки на основе параметрической электронной модели литьевой формы.

5. Описана методика создания ассоциативной электронной модели оснастки для получения детали «Кронштейн крепления заднего тормоза» с использованием базы типовых элементов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Митрофанов С.П., Научная организация серийного производства – М.: Машиностроение. – 1970. - 768 с.
2. Вегман Е.Ф., Metallургия чугуна – Москва -3-изд., переработанное и дополненное. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004 – 774 с.
3. Михайлов А.М. и др., Литейное производство: Учебник для металлургических специальностей вузов. – М.: Машиностроение, 1987. – 256с.
4. Рыжиков А.А., Технологические основы литейного производства: Учеб. пособие. – М.: Машгиз, 1962. – 527 с.
5. Рихтер Р., Конструирование технологичных отливок. – М.: Машиностроение, 1968. – 254 с.
6. 53464 - 2009. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку.
7. Емельянова А.П., Технология литейной формы.: Учебник для техникумов цветной металлургии. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
8. Гиршович Н.Г., Справочник по чугунному литью. – Л.: Машиностроение, 1978 – 758 с.
9. Титов Н.Д., Степанов Ю.А. Технология литейного производства.: Учебник для машиностроительных техникумов. – М.: Машиностроение, 1978. – 432 с.
10. Скарбинский М. Конструирование отливок. – М.;Л.: ГНТИ Ленингр. отд. Машгиза, 1961. – 575 с.
11. Обзор продукта CATIA-V5 за 2018 год [Электронный ресурс] - URL: <https://bourabai.ru/cm/catia.htm>
12. Гончаров П. С., Ельцов М. Ю., Коршиков С. Б., Лаптев И. В., Осинюк В. А. NX для конструктора-машиностроителя. — М.: ИД ДМК Пресс, 2010. — 504 с.

13. Обзор продукта КОМПАСС 3-Д версии 2018 года [Электронный ресурс] - URL: <https://ascon.ru/products/7/review/>

14. Моделирование в LVMFlow – затвердевание стальной отливки в песчано-глинистой форме [Электронный ресурс] / О. М. Огородникова // Учебно-исследовательская работа студентов. Компьютерный практикум. Практическая работа. – Екатеринбург, УГТУ-УПИ, 2009. – 31 с. – Режим доступа: <http://cae.ustu.ru/download/lvm1.pdf>

15. Пример оптимизации технологии и моделирование литья в программном комплексе SOLIDCast [Электронный ресурс] // Файл презентации Microsoft PowerPoint. – Екатеринбург, Делкам-Урал. – 16 с. – Режим доступа: <http://www.iengineer.ru/sites/default/files/OptimizeExample.ppt>

17. Adli Bahari, Roger Lewis and Tom Slatter. Hardness characterisation of grey cast iron and its tribological performance in a contact lubricated with soybean oil., 2008. - 25 с. - Режим доступа: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954406216675895>

18. H. Kambayashi, Y. Kurokawa. H. Miyake. Observation of Defects in Cast Iron Castings by Surface Analysis., 2010. - 49 с. - Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/369179281/Observation-of-Defects-in-Cast-Iron-Castings-by-Surface-Analysis>

19. H. Kambayashi, Y. Kurokawa. H. Miyake. Orange peel defect., 2015. - 15 с. - Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/369179281/Observation-of-Defects-in-Cast-Iron-Castings-by-Surface-Analysis>

20. Muhammad Azhar Ali Khan and Anwar Khalil Sheikh. Simulation tools in enhancing metalcasting productivity and quality, 2010. - 19 с. - Режим доступа: <http://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0954405416640183>

21. K.D. Carlson, S. Ou and C. Beckerman: Metall. Mater. Trans. B, 2005, vol. 36B pp. 843-56, Режим доступа: <https://ru.scribd.com/document/369179281/Metall-Mater-Trans>

22. ГОСТ 7293-85. Чугун с шаровидным графитом для отливок.

23. И1200.37.101.0070-2015 Технологическая инструкция: приготовление формовочной смеси для АФЛ в ЧЛП МТП.
24. РД 37.002.0475-86 Нормирование расхода материалов в литейном производстве предприятий автомобильной промышленности
25. ГОСТ 4832-95 Чугун литейный технические условия
26. ГОСТ 2.052-2006. Единая система конструкторской документации. Электронная модель изделия. Общие положения.
27. С. Г. Лихоузов, А. Н. Чичко, В. Ф. Соболев, Т. В. Матюшинец, О. А. Сачек, О. И. Чичко, О методе системного анализа литниковых систем на основе данных моделирования пространственных изображений температур расплава // Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, 1990. - 294 с.
28. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. / Под ред. А. Г. Косиловой и Р. К. Мещерякова. – Т. 1. – М.: Машиностроение, 1985. – 656 с. Т. 2. – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
29. ГОСТ 26645–85. Отливки из металлов и сплавов. Допуски размеров, массы и припуски на механическую обработку.
30. ГОСТ 3212–92. Комплекты модельные. Уклоны формовочные, стержневые знаки, допуски размеров.
31. ГОСТ 3.1125–88. Правила графического выполнения элементов литейных форм и отливок.