

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

ИНСТИТУТ МАШИНОСТРОЕНИЯ
Кафедра «Сварка, обработка материалов давлением и родственные процессы»

15.04.01 Машиностроение

(код и наименование направления подготовки, специальности)

Системы автоматизированного проектирования в машиностроении

(направленность (профиль))

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему «Разработка метода оптимизации процессов формообразования
управляющих программ в САМ-системе»

Студент

Н.Н. Лещев

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

П. Н. Шенбергер

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

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 2017

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Состояние вопроса и существующий уровень автоматизации	10
1.1 Анализ существующего уровня автоматизации процессов обработки .	10
1.2 Понятие о CNC-системах и их роль в производстве	11
1.3 История развития САМ-систем	15
1.4 Уровень разработок	16
1.5 Тенденции развития	18
1.6. Выводы	24
Глава 2. Общие сведения о группе обрабатываемых деталей и методах их обработки	25
2.1 Общие сведения о группе обрабатываемых деталей	25
2.2 Оборудование, используемое при обработке деталей типа матрица	27
и пуансон	27
2.3 Программное обеспечение процесса обработки	28
2.4 Анализ способов обработки поверхностей	28
2.5 Существующие методы оптимизации	34
2.6 Выводы	35
Глава 3. Структурная оптимизация процессов механической обработки	36
3.1 Анализ типовой детали	36
3.2 Структурная оптимизация технологического процесса	40
3.3 Выбор вида заготовки и метода её изготовления	42
3.4 Структурный анализ выбора типового маршрута обработки	48
3.5 Выводы	63
Глава 4. Усовершенствование управляющей программы для оборудования с ЧПУ	64
4.1 Разработка и усовершенствование управляющей программы чистовой обработки	65
4.2 Выводы	75
Глава 5. Параметрическая оптимизация процессов механической обработки	76

5.1	Определение целевой функции	76
5.2	Создание математической модели процесса обработки	79
5.3	Режущие возможности инструмента	80
5.4	Мощность привода главного движения станка	81
5.5	Наименьшая и наибольшая скорости резания и подачи	81
5.6	Требуемая шероховатость обрабатываемой поверхности	82
5.7	Определение математической модели	83
5.8	Выводы.....	85
	Заключение.....	86
	Список использованных источников	87

Введение

Организация современного эффективного и конкурентоспособного производства, отвечающего потребностям потребителей, немыслима без применения технологий, идущих в ногу со временем. Основным инструментом сложной металлообработки являются станки с числовым программным управлением (ЧПУ). Для обеспечения бесперебойной работы такого оборудования требуется не только квалифицированное обслуживание, обученные операторы и наладчики, но и тщательная технологическая подготовка производства. Решение подобных задач возможно с помощью систем автоматизированного проектирования (САПР).

Автоматизация производства определяется технологиями, состоящими в использовании компьютерных систем для планирования, управления и контроля операций производства через прямую или косвенную взаимосвязь с производственными ресурсами [1]. В ряде случаев под аббревиатурой САМ понимают числовое программное управление и системы, предоставляющие возможность автоматизированного создания управляющих программ для станков с ЧПУ. Это происходит из-за того, что ЧПУ является одним из наиболее действенных подходов к автоматизации производства.

САМ - системы прочно обосновались в современном машиностроительном мире. Они нашли своё применение в авиационной промышленности, судостроении, в производствах, связанных с медициной и т.д. Такие качества САМ-систем как способность генерации сложных траекторий инструмента, высокая скорость создания управляющих программ, возможность постпроцессирования для практически всех существующих систем ЧПУ открыли множество возможностей в областях, связанных с обработкой сложных поверхностей. Детали, имеющие сложные трёхмерные поверхности, высокие требования к точности и, конечно, стремление производителей снизить издержки – вот основные драйверы индустрии ЧПУ, а значит и САМ-систем в нашей стране и мире.

С ростом числа производств – потребителей САМ–продуктов, растёт и конкуренция между компаниями, занимающимися разработкой соответствующих САПР. За 2014 год объём отечественного рынка таких систем вырос на 18,35%, что так же является показателем роста потребления станков с программным управлением [2]. Разработчики программ стремятся все больше упростить и ускорить процесс генерирования траекторий обработки для станков с ЧПУ. САМ-системы постоянно идут по пути развития. Разрабатываются и выходят в свет всевозможные узкоспециализированные приложения для решения конкретных задач пользователей, появляются все новые инструменты создания УП, стратегии обработки и интеллектуальные функции. Разработчики стремятся укрепить своё положение на отечественном рынке за счёт интегрирования своих продуктов в наиболее популярные САД-системы.

В проблемах, связанных с производством штампов, на сегодняшний день практически невозможно обойтись безобработки с ЧПУ. Формообразующие части штампов и пресс-форм зачастую являются сложными в мехобработке деталями.

В данной работе будут рассматриваться такие формообразующие части вытяжных штампов как пуансон и матрица, не разбитые на секции и предназначенные для средней штамповки. Цельность такого инструмента обусловлена сложностью сборки образованных секций и применимостью таких штампов в среднесерийном производстве.

Т.к. штамповое производство продолжает своё развитие в России, проблемы производства штамповой оснастки продолжают быть актуальными. Основными проблемами в данной сфере являются: оптимальная загрузка оборудования с ЧПУ деталями и оптимизация самой обработки, с целью снизить время работы станков, а значит и себестоимость готовой продукции.

Наиболее распространённым оборудованием с ЧПУ при производстве штамповой оснастки по-прежнему остаются трёх-осевые станки фрезерной группы и станки электроэрозионной группы (как проволочные, так и

прошивные). Увеличение количества управляемых осей на станках фрезерной группы, конечно же, увеличивает среднюю производительность обработки, однако обходится предприятию в приобретение и обслуживание достаточно дорогостоящего оборудования, особенно в условиях отсутствия (или низкого развития) подобного станкостроения в нашей стране. Поэтому, покупку 5-ти осевых (равно как и 3+2-осевых) станков могут позволить себе лишь крупные предприятия, способные обеспечить высокую загрузку такого оборудования сложными в обработке деталями. В виду изложенного, в данной работе будут рассматриваться лишь трёх-осевые станки фрезерной группы.

Для рассматриваемых деталей характерны малые допуски и низкая шероховатость ответственных поверхностей, что влечёт за собой повышение трудоёмкости их изготовления. На чистовом этапе плоские участки пуансонов и матриц обычно подвергаются шлифовке, если это возможно. Остальные же поверхности обрабатываются на фрезерном и электроэрозионном оборудовании. Чистовое фрезерование подобных деталей заставляет использовать высокопроизводительный и точный инструмент, такой как цельные и сборные твердосплавные фрезы, т.к. твёрдость используемых сталей после термической обработки обычно достигает 60-62 HRC. Правильный выбор и использование инструмента является одним из важных моментов в оптимизации механической обработки.

В общем смысле в задачи оптимизации входит нахождение максимумов (или минимумов) некой целевой функции в определённом (допустимом) множестве задачи. Результаты оптимизации зависят от правильно выбранных целевых функций и критериев оптимизации.

К этапам оптимизации можно отнести:

1. Определение целевых функций, подлежащих оптимизации.
2. Выделение критериев оптимизации.
3. Выявление управляющих параметров.
4. Оптимизация путём применения различных математических методов.

В качестве целевой функции в работе будет установлено такое соответствие между переменными процесса, которое при заданных критериях производства обеспечит наилучшее решение задач, связанных с обработкой матриц и пуансонов штамповой оснастки.

Критерием оптимизации обычно называют некий показатель решения проблемы, по значению которого определяется оптимальность найденного подхода. Оптимизация с количеством параметров более одного является многокритериальной задачей.

В данной работе в качестве критериев выступают:

1. Параметры режимов резания.
2. Машинное время диктуемой управляющей программой.
3. Высокая производительность операций обработки.
4. Автоматическое определение стратегий обработки и др.

Для проведения оптимизации в условиях многокритериальной задачи необходимо проведение ранжирования критериев по степени важности с помощью экспертных оценок, а также анализ иерархий [3].

Порядок применения этого метода имеет следующий вид:

1. Построение математической модели в виде иерархии, учитывающей целевую функцию, критерии для оценки и альтернативные варианты решения.
2. Определение приоритетности элементов путём их сравнения.
3. Создание глобальных приоритетов (если требуется).
4. Принятие определенного решения задачи на основе полученных результатов.

Выбор наиболее важных критериев, основанный на опыте и рекомендациях экспертов, является субъективным. Помимо этого, векторная оптимизация не даёт абсолютно правильного решения, так как в ряде случаев улучшение одного параметра отражается на другом. Поэтому решение рассматриваемой задачи будет компромиссным, что в итоге и даёт возможность создания, в определённой степени, универсальной

математической модели.

Стоит отметить, что критериями целевой функции так же будут являться параметры автоматизации подготовки производства. Т.е. велико влияние используемой САМ-системы на результаты оптимизации.

Целью диссертации является создание методики совершенствования технологического процесса обработки формообразующих деталей штамповой оснасти на станках с ЧПУ за счёт оптимизации структуры маршрута обработки и параметров фрезерования.

Объектом исследования в работе является разработка технологического процесса фрезерования рабочих инструментов штампов для листовой штамповки на станках с ЧПУ.

Предметом исследования являются методы оптимизации структуры маршрутов механической обработки и параметров фрезерования.

Научные положения и результаты исследования выносимые на защиту:

1. Структурная оптимизация технологического процесса;
2. Параметрическая оптимизация процессов механической обработки;
3. Оптимизация управляющей программы для оборудования с ЧПУ.

Научная новизна работы. Разработаны алгоритмы структурной оптимизации технологического процесса. Построена математическая модель процессов обработки, учитывающая технологические факторы в виде ограничений.

Практическая ценность. Разработанные методы оптимизации позволяют снизить себестоимость и трудоёмкость обработки цельных формообразующих частей вытяжных штампов. Предложенный алгоритм создания управляющих программ для оборудования с ЧПУ позволяет учесть специфику обработки цельных формообразующих деталей.

Публикации. По теме диссертации опубликована 1 статья и тезисы.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и приложений. Объём работы 90 страниц.

Глава 1.Состояние вопроса и существующий уровень автоматизации

1.1 Анализ существующего уровня автоматизации процессов обработки

Станки с ЧПУ являются системами, включающими в себя оборудование, в частности станок, а также модуль программного управления. На заре развития таких станков в качестве модуля управления использовались сложные устройства, собранные на твердотельных цепях и работающие на лампах. Система управления покадрово считывала программу с перфокарты или перфоленты, в которых массив отверстий играл роль программного кода. Более поздние станки были созданы с использованием интегральных схем, а дальнейшее развитие компьютерной техники позволило использовать для управления станком микроконтроллеры. В конечном итоге системы управления станками стали практически не отличимыми от персональных компьютеров, различаясь лишь программной частью.

Помимо развития системы управления, свою эволюцию проходил и сам станок. Введение различных новшеств способствовало превращению механообрабатывающего станка в обрабатывающий центр. Наиболее продвинутые станки с ЧПУ на сегодня имеют большое количество осей, в которых могут находиться заготовка и инструмент относительно друг друга в процессе обработки. Стало возможным производить на одном станке как токарные, так и фрезерные операции, и даже совмещать эти виды обработки. Станочное оборудование получило возможность автоматически менять и образмеривать инструмент, что позволило создавать управляющие программы большого объёма, производящие полную обработку детали, как в рамках одного установка, так и с перехватом детали. Станки с ЧПУ позволяют не только снизить время обработки детали и количество брака, но и значительно повысить точность готовой продукции.

Одной из наиболее распространенных и востребованных типов систем

ЧПУ является CNC, что, собственно, и переводится как «ЧПУ». Однако, CNC-тип систем компьютеризированных станков имеет свои отличия.

1.2 Понятие о CNC-системах и их роль в производстве

Системы CNC эволюционировали из систем NC в 70-х годах прошлого века. Основная и ключевая их особенность состоит в том, что CNC системы созданы с использованием микроконтроллеров (микропроцессоров), что и делает их компьютеризированными (Computer Numerical Control).

Помимо того, что с использованием микропроцессоров в разы выросла вычислительная мощность систем с ЧПУ, станок получил возможность записывать программы на специальный блок памяти MCU. Так же, программно реализовав в CNC-системе алгоритмы, производители станков с ЧПУ предоставили возможность использования заранее запрограммированных циклов обработки.

Блок управления ЧПУ является основным блоком системы и выполняет следующие функции:

1. Загрузка управляющей CNC программы.
2. Сохранение загруженных CNC программ.
3. выбор на выполнение сохраненных CNC программ управления;
4. синтаксический и семантический разбор программы управления;
5. расчет траектории движения с учетом технологических ограничений;
6. прием и передача данных контроллерам приводов (для реализации функций управления);
7. взаимное согласование движения по координатам;
8. отображение технологической информации и состояния ЧПУ на экране дисплея;
9. отработка сигналов, принимаемых с технологического пульта.

Контроллер координат (привода) является локальным устройством управления приводом соответствующей координаты и выполняет следующие

функции:

1. Выдаёт сигналы управления приводу соответствующей координаты.
2. Принимает и преобразует сигналы с датчиков положения.
3. вычисляет текущую позицию координаты;
4. отработывает функции ограничения максимальной скорости и ускорения по координате;
5. отработывает функции защиты привода при срабатывании концевых датчиков и датчика нулевой точки;
6. отработывает функцию выхода на нулевую точку;
7. автоматически определяет временные, переходные и инерционные характеристики привода, на основании которых вычисляет адаптивные коэффициенты управления приводом координаты;
8. для управления приводом используются алгоритмы ПИ-регулятора;
9. есть возможность ввода таблицы коррекции шага винта, которая предоставляется производителем станка;
10. есть возможность коррекции люфта винта.

Надо отметить, что в контроллере координат (в декодере датчика) применён метод 4-кратного умножения, что позволило добиться уменьшения ошибки позиционирования до $+0,25$ деления датчика при прямолинейном движении и $+0,5$ деления датчика при движении по контуру.

Технологический пульт реализует следующие функции системы:

1. Запуск управляющей программы.
2. Останов управляющей программы.
3. регулировка линейной скорости всех приводов в диапазоне 0-120%;
4. переключение: ручной/автоматический режим работы;
5. выход на начало программы;
6. функция "смена инструмента";
7. функции перемещения по координатам;

8. запрос "нулевого цикла".

Контроллер автоматики предназначен для согласования релейной автоматики контроля и управления станка с программой ЧПУ. Контроллер производит обработку сигналов аварийной сигнализации станка и обеспечивает выдачу управляющих сигналов от ЧПУ в релейную схему управления станка.

Контроллер состоит из следующих компонентов:

1. Контроллера.
2. платы входных оптронных развязок для подключения датчиков на 8 каналов;
3. платы выходных оптронных развязок сигналов управления на 8 каналов.

Наиболее распространёнными производителями систем ЧПУ уже многие годы являются:

- Siemens;
- Fanuc;
- Heidenhain;

Далее представлены отечественные производители систем ЧПУ:

- «Маяк» Ижевского ООО «Ижпрэст»;
- ООО «Балт-Ситстем»;
- «4С», г. Санкт-Петербург и др.

Изобретателем первого станка с числовым (программным) управлением является Джон Пэрсонс (John T. Parsons), работавший инженером в компании ParsonsInc. Он впервые предложил использовать для обработки пропеллеров станок, работающий по программе, вводимой с перфокарт.

Создание современной конкурентоспособной системы ЧПУ является очень трудоемкой задачей, требующей вовлечения больших человеческих и «мозговых» ресурсов, не говоря уже о финансовых вливаниях.

Разработка самой системы ЧПУ, по своей сути, является вопросом разработки «софта». Но помимо программной части необходима разработка соответствующих блоков управления станком с ЧПУ (микроконтроллеры и т.д.). По этой причине, зачастую за разработку CNC-систем берутся сами производители станков, взяв на себя ответственность за качество всех составляющих системы.

Для функционирования же самой CNC-системы необходим сравнительно небольшой коллектив, включающий в себя программистов, разрабатывающих программы для станков с ЧПУ, рабочих (операторов), наладчиков, и ремонтно-отладочный персонал. Разово придется воспользоваться услугами программиста, для написания постпроцессоров для купленного оборудования под используемую САМ-систему (при условии, что таковых нет в САМ-системе в качестве стандартных), либо при наличии специалистов на предприятии, написать его самостоятельно.

CNC-системы задействуют такой элемент цифрового макета изделия, как производственные данные. Используя данные полученные из САМ-системы и основанные математической модели изделия, система ЧПУ осуществляет покадровую отработку программы на оборудовании, обеспечивая необходимые требования к продукту и учитывая специфику и возможности станков. Так же, подход CNC может обеспечивать постоянную «подгрузку» частей программы из источника – компьютера-сателлита или сервера, обеспечивающего программами обработки группу станков.

Свое основное назначение ЧПУ-системы в современном производстве нашли в автоматизации процессов, трудно- или совсем не выполнимых человеком. Они произвели настоящую революцию в сложной контурной и 3D-обработке. На сегодня CNC – самый зрелый подход к автоматизации производства и его технологической подготовке и в определенных сферах производства без него просто не обойтись.

Развиваясь, системы ЧПУ открывают все большие возможности для производства. Еще недавно 5-ти осевая обработка и совмещение токарной и

фрезерной обработки на станках с ЧПУ были сродни фантастике. Сегодня такими подходами пользуются многие развитые производства.

С течением времени, программная составляющая в производственном оборудовании получает все больший вес, и порой, превосходит по значимости аппаратную. Это стимулирует разработчиков CNC- систем развивать свои продукты, использовать все новые подходы к автоматизации и снижению времени выпуска готовой продукции.

1.3 История развития САМ-систем

Сами САПР, а тем более их САМ-составляющие, нашли свое широкое применение сравнительно недавно. В большинстве случаев их развитие «тормозила» недостаточно развитая вычислительная техника. Даже сегодня, не говоря о заре становления САПР, программные продукты часто нуждаются в более продвинутом аппаратном обеспечении, хоть и базируются, в основном на самых распространенных операционных системах.

Первые системы автоматизированного проектирования возникли благодаря острой потребности промышленности в инструменте, который заменит кульман - устройство, позволявшее производить чертежи с погрешностью не менее 0,1 мм. Развитие машиностроения, электроники, космических технологий и медицины предъявляло все большие требования к проектированию, к его точности и скорости. В 60-е годы прошлого века появились определенные разработки, которые позволили сделать вывод о том, что проектирование вообще способно компьютеризироваться. Появились программные продукты способные к автоматизированному черчению. Наиболее ранняя интерактивная графическая система была разработана доктором Патриком Хенретти, в компании GeneralMotors.

Дальнейшее развитие микропроцессоров способствовало массовому появлению программных продуктов. В 80-е годы появляются первые системы 3D моделирования и само понятие твердотельного моделирования. К 1982 г. твердотельное моделирование начали использовать в своём ПО такие

компании как Computervision, IBM, Prime и др. Однако на больших предприятиях, в те годы, не прослеживалось единство используемых программных продуктов, что мешало новой потребности в передаче моделей и других данных из одного этапа жизненного цикла изделия в другой.

Проблемы несовместимости данных существовали вплоть до 90-х годов. Первым её решением стали программные продукты, осуществляющие конвертацию данных из формата в формат, а в последствии и сами крупные производители стали предоставлять возможность обмена информацией в наиболее распространенных форматах.

Деятельность разработчиков в то время устремилась к стандартизации, расширению функционала графических языков для более полного описания 3D-моделей и других характеристик изделия. В САД-разработках стандартизация основных действий и решений моделирования способствовала созданию геометрических ядер, способных применяться в различных САПР. Из них, наиболее успешными стали геометрические ядра Parasolid и ACIS. Именно на этих ядрах были созданы наиболее успешные и распространенные САПР в мире.

1.4 Уровень разработок

Современные САМ-системы в своем развитии фактически достигли рубежа, при котором основной целью разработчиков является не увеличение функционала программного продукта, а простота его применимости, интуитивно-понятный для пользователя интерфейс, автоматизация процессов подготовки управляющих программ. С момента, когда наиболее распространенные САМ-системы своим функционалом стали покрывать практически все потребности инженеров-программистов, к ним стало появляться новое требование — снижение уровня квалификации инженеров, использующих эти программные средства.

Некоторые разработчики стали активно упрощать интерфейс своих продуктов. Так, в некоторых системах появились различные так называемые

«мастерами», способные помочь пользователю быстро и безошибочно произвести некоторые действия, такие как создание заготовки, правильное ориентирование модели детали в системе координат, определение основных элементов модели и подбор инструмента для их обработки, и др. Так же, некоторые программные продукты изначально содержат в себе методики или модули, с помощью которых пользователь может освоить основной функционал системы и произвести некоторые простые действия руководствуясь подсказками. В связи с этим, для работы в некоторых САМ-системах, на определенном уровне, обучение (от разработчиков или продавцов) может оказаться и вовсе не нужным.

Одной из интересных сторон развития САМ-систем является их САД-составляющая. На первый взгляд данная тема кажется малозначимой, т.к. построение модели изделия логичней производить в САД-системе, где есть весь необходимый для этого функционал. Однако, без определенных построений пользователю САМ просто не обойтись. Чаще всего, программисту требуются такие функции, как продление поверхностей, «зашивание» отверстий и карманов, не подлежащих обработке на данном этапе, построение различных контуров для ограничения или уточнения траекторий инструмента, объединение или разбиение поверхностей, создание модели заготовки и т.д. Наличие таких возможностей позволяет программисту ЧПУ не обращаясь к конструкторам, самостоятельно подготовить модель для создания корректных управляющих программ. Как ни странно, на подобную подготовку у пользователя САМ может уходить 30% и более всего объёма времени, затрачиваемого на написание программ ЧПУ [2].

Естественным образом появилась потребность в автоматизации подобных построений и доработок. Во многих САМ-системах появились такие функции, как построение точек в центре окружностей (либо осевых линий в отверстиях), автоматическое создание контуров на границах поверхностей, автоматическое создание модели заготовки с необходимым

припуском в любом направлении и др. Так же, многие САМ-системы приобретают возможность автоматического распознавания элементов модели, будь то отверстия, карманы или плоскости. Это позволяет пользователю выбрать определенную группу конструктивных элементов изделия и назначить общие параметры на их обработку. Наиболее продвинутые САМ-системы, при должном наполнении их т.н. баз знаний, способны автоматически подобрать необходимый набор операций и инструмента для обработки определенных элементов изделия (или группы элементов).

Относительно недавно, среди разработчиков САМ, появилась тенденция интегрирования их ПО в наиболее популярные САД-системы. Подобная интеграция позволяет не только безошибочно передавать модели из САД в их «родном» формате, но и сохранять дерево построения самой модели. Плюсы подобного подхода очевидны: появляется возможность атрибутивно передавать в САМ информацию о допусках на размеры элементов модели и материале детали, что в свою очередь влияет на автоматически назначаемые операции и режимы обработки; облегчается определение САМ-системой конструктивных элементов модели; у программиста появляется возможность исключать из модели ненужные элементы, не прибегая к моделированию или построениям.

1.5 Тенденции развития

С момента преодоления цифрового рубежа, все большую роль в производстве играет ПО и знания, а аппаратная составляющая медленно, но верно становится предметом потребления.

В самой ближайшей перспективе, мировое производство обещает нам внедрение концепции «Промышленность 4.0». Суть этой концепции заключается в том, что привычные алгоритмы производства будут нарушены в следствие постоянной коммуникации между продуктами, системами и машинами. Это позволит создавать системы «умной» автоматизации в которых машины и устройства смогут обмениваться данными, приобретут

способность понимать свое окружение и общаться по интернет-протоколу. Ключевой частью концепции является информация, вкладываемая в продукт, которая, в процессе производства позволит автоматизировано отслеживать отклонения от определенных норм. Основным драйвером данной концепции является развитие информационных технологий, средствами которых и будет осуществляться обмен данными о продукте в ходе его создания.

Одной из сторон такого направления являются облачные технологии, внедряемые, если уж не во всеобъемлющую PLM-систему, то, по крайней мере, в САМ-модули. Уже сейчас существуют облачные сервисы, позволяющие создавать УП не сложной обработки для практически всех распространённых систем ЧПУ. Однако самым перспективным на сегодняшний день направлением таких технологий является создание открытых баз данных, из которых САМ-системы будут способны применять, для создания УП, такие данные, как режимы резания, данные о самом инструменте в виде 3D моделей, которые можно будет применять для верификации и многое другое. Огромным плюсом будет являться то, что преимущественно наполнение таких баз будет ложиться на плечи производителей самого инструмента и оснастки, а пользователи, в процессе их использования, смогут их модернизировать и предлагать свои решения.

Так же, очень интересен вопрос о способности облачных технологий к автоматизации подбора инструмента и рекомендуемых режимов резания, в ответ на запрос САМ-системы, несущего информацию о распознанных конструктивных элементах 3D модели обрабатываемой детали, ее материале и др.

Еще одной возможной областью применения облачных технологий являются перспективные направления КВМ и FBM. С их помощью САМ-система получает возможность не только распознавать конструктивные элементы модели, но и автоматически создавать различные варианты обработки этих элементов, назначать соответствующие стратегии обработки и т. д. Роль «облаков» в данном случае — создание взаимодействующих баз

данных, из которых и будут черпаться решения, предложенные ранее другими пользователями системы. С использованием модулей КВМ пользователю будет достаточно задать «нули» детали, назначить тип обработки (фрезерная, токарная и/или др.), запустить автоматическое распознавание элементов и выбрать из предложенных подходящий вариант обработки, после чего заняться постпроцессированием УП.

Развитие САМ-систем в отношении траекторий и стратегий обработки так же имеет перспективное направление в высокоскоростном резании. Высокоскоростная обработка (ВСО) теоретически базируется на т. н. кривых Соломона, которые являют собой графики изменения нагрузки на инструмент в процессе повышения скорости резания, подачи и др. характеристик. Экспериментально было обнаружено, что в некотором диапазоне сверхвысоких скоростей обработки нагрузки на инструмент существенно снижаются, позволяя, без резких колебаний параметров обработки, продолжать процесс резания. Основные требования высокоскоростной обработки это: малое сечение стружки, высокие обороты шпинделя и высокая минутная подача. Так же, для применения ВСО потребуется специальный инструмент и желательно проведение опытных обработок для корректировки режимов резания при обработке определенного материала. Значимость САМ-системы в применении ВСО достаточна весома, т. к. возникает необходимость в получении таких траекторий, которые обеспечивали бы постоянные нагрузки на инструмент, минимизируя их колебания, максимально снижали бы количество врезаний инструмента в заготовку и т. д. Постепенно решения ВСО появляются и в многоосевой обработке. Однако, при том, что многие САМ-разработчики уже внедрили новые стратегии обработки в свои продукты, предложить оптимальные для ВСО обработки режимы резания могут далеко не все.

После создания траекторий и генерации управляющей программы, серьезному программисту ЧПУ необходимо проверить результат своей работы на корректность. Помимо правильности траекторий, пользователя

интересует, сможет ли станок с определенной кинематикой, используя конкретные приспособления, обработать заготовку по данной управляющей программе. Ведь зачастую, особенно при обработке детали в несколько установов, программисту приходится осуществлять обработку с учетом различной оснастки, которая должна быть отражена в картах наладки детали. В таких случаях, некоторые САМ-системы позволяют пользователю создать 3D модели оснастки, расположить их на детали прямо во время создания УП, и сгенерировать машинную программу с требованием к станку обходить обозначенную оснастку. Этого, однако, не всегда достаточно. Существует опасность, что с оснасткой или частью детали столкнется не сам инструмент, а его патрон либо головка шпинделя. Для того, чтобы предупредить такой исход событий программист может воспользоваться внутренними средствами верификации САМ-системы или сторонним программным продуктом.

Т.к. полноценной верификации нет в большинстве САМ-систем, появилась отдельная группа программ, способных провести виртуальную обработку заготовки с учетом модели станка, оснастки, патрона и т.д. Так же, существующие модули верификации в некоторых САМ-системах используют не конечный файл УП, а промежуточный CL-файл, который может не выдать правильную программу обработки при некорректном постпроцессоре. Эту проблему тоже решают сторонние программы верификации, используя только конечную УП.

После виртуальной обработки в системе верификации, конечную модель можно разглядеть на наличие зарезов. Во многих системах предусмотрена цветовая подсветка остаточного припуска на модели заготовки. Такие данные могут быть получены путём сравнения обработанной модели с моделью готового изделия.

В случаях многоосевой обработки, большую значимость в симуляции занимает кинематическая модель станка. Она может содержать все значимые характеристики оборудования, вплоть до элементов защитных кожухов. С ее помощью, ПО, осуществляющее верификацию, в автоматическом режиме

сможет проверить все элементы станка на соударения, возможность выполнения данной УП на конкретном оборудовании с точки зрения габаритов и т.д.

Заключительным этапом в создании управляющей программы является постпроцессирование. Данный процесс представляет из себя перевод промежуточных CL-файлов (Cutter Location), созданных САМ-системой, в программу для конкретного станка.

Сам постпроцессор представляет собой набор исполняемых файлов, которые способны к генерированию УП только для конкретного станка. Раньше процесс создания постпроцессоров был дорогим и долгим процессом, т.к. требовал квалифицированного программиста. Сегодня, множество постпроцессоров для наиболее распространённых станочных стоек находятся в свободном доступе, либо идут в комплекте с САМ-системами. Трудности возникают при использовании наиболее сложного и специфического оборудования. Однако и при таких случаях есть выход.

Наиболее простым решением является универсальный постпроцессор или генератор постпроцессоров. Генератор постпроцессоров призван с помощью интуитивно-понятного интерфейса, облегчить создание нового постпроцессора. В данном случае, для создания постпроцессора, хорошей квалификации технолога-программиста уже вполне достаточно. Однако, в созданные исполняемые файлы, являющиеся, по сути, шаблоном, обычно приходится вносить некоторые изменения, которые требуют от технолога глубокого понимания кинематики станка и знания основ скриптового языка, на котором и написан основной исполняемый файл. Универсальные постпроцессоры бывают двух видов: независимые, и работающие только с определённой САМ-системой (обычно являясь её внутренним модулем).

Помимо всех перечисленных тенденций, можно отметить и ещё одну. Она выделяется на фоне изложенных тем, что бросает вызов классической мехобработке, путём создания гибридных станков с ЧПУ. Гибридные станки как таковые существуют уже достаточно давно, однако новые веяния

обещают нам введение в традиционное производство аддитивных технологий. Многоосевой станок с ЧПУ, способный в одном технологическом процессе, без снятия детали со станка, произвести необходимую доработку изделия с помощью 3D печати, обещает, при правильном использовании и достаточной загруженности, неплохие прибыли. 3D печать металлом, естественно, имеет достаточно серьезные трудности в применении, и тем более, на станках с ЧПУ. Что, однако не помешало некоторым производителям САМ-систем, уже в 2015 году вводить в свои продукты модули, позволяющие комбинировать фрезерование, точение и 3D печать.

Подводя итог вышесказанному, можно определить основные направления и принципы развития САМ-систем:

- создание облачных ресурсов, использующих базы знаний, которые позволят оказывать инженеру существенную помощь в принятии решений;
- создание облачных сервисов, позволяющих автоматически (или автоматизировано), путем интеграции с САМ, подбирать инструмент и режимы обработки;
- дальнейшее продвижение FBM и KBM в многоосевую обработку;
- дальнейшее и более углубленное интегрирование САМ-систем в системы CAD;
- появление новой концепции постпроцессирования и использования кинематической модели станка для расчетов операций;
- все большее увеличение роли программного обеспечения станочных «стоек» в конкурентной борьбе производителей станков;
- дальнейшее упрощение интуитивного понимания интерфейсов пультов управления станков с ЧПУ, что позволит работодателям нанимать на работу все менее квалифицированный рабочий персонал;
- интегрирование САМ-систем в планшетные компьютеры, появление новых интерфейсов;
- развитие рендеринга в области САМ-систем;

- увеличение функционала систем ЧПУ в роли САМ-систем;
- развитие в САМ-системах поддержки операций аддитивной обработки;
- развитие модулей симуляции с применением кинематических моделей станочного оборудования и использование фотореалистичной графики.

Не трудно заметить, что практически все направления развития, так или иначе, но относятся к автоматизации производства и подготовки управляющих программ для ЧПУ оборудования в частности, его надёжности и гибкости. Высокий уровень развития в этих направлениях как сегодня, так и в будущем, будет отделять развитые производства от отстающих.

1.6. Выводы

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Осуществить анализ существующего уровня автоматизации процессов обработки.
2. Выполнить исследование особенностей типовых деталей.
3. Провести анализ способов обработки поверхностей типовых деталей на фрезерном оборудовании с ЧПУ.
4. Осуществить структурную оптимизацию технологического процесса на примере ТП типовой детали.
5. Провести параметрическую оптимизацию процессов механической обработки на примере чистовой обработки типовой детали.
6. Выполнить оптимизацию управляющей программы обработки для оборудования с ЧПУ на примере операции чистового фрезерования типовой детали.

Глава 2. Общие сведения о группе обрабатываемых деталей и методах их обработки

2.1 Общие сведения о группе обрабатываемых деталей

В данной работе будет рассмотрена группа формообразующих деталей средней величины штампов, производимых в условиях единичного производства.

Детали, входящие в исследуемую группу, имеют ряд конструктивных особенностей:

1. Малые допуски, предъявляемые к сложным поверхностям (до 1мкм).
2. Большой перепад высот (более 5 диаметров используемого при обработке инструмента).
3. Высокая твёрдость после термообработки (55-60HRC).
4. Совмещение в одной детали выпуклых, вогнутых и плоских поверхностей (рисунок 2.1.1).

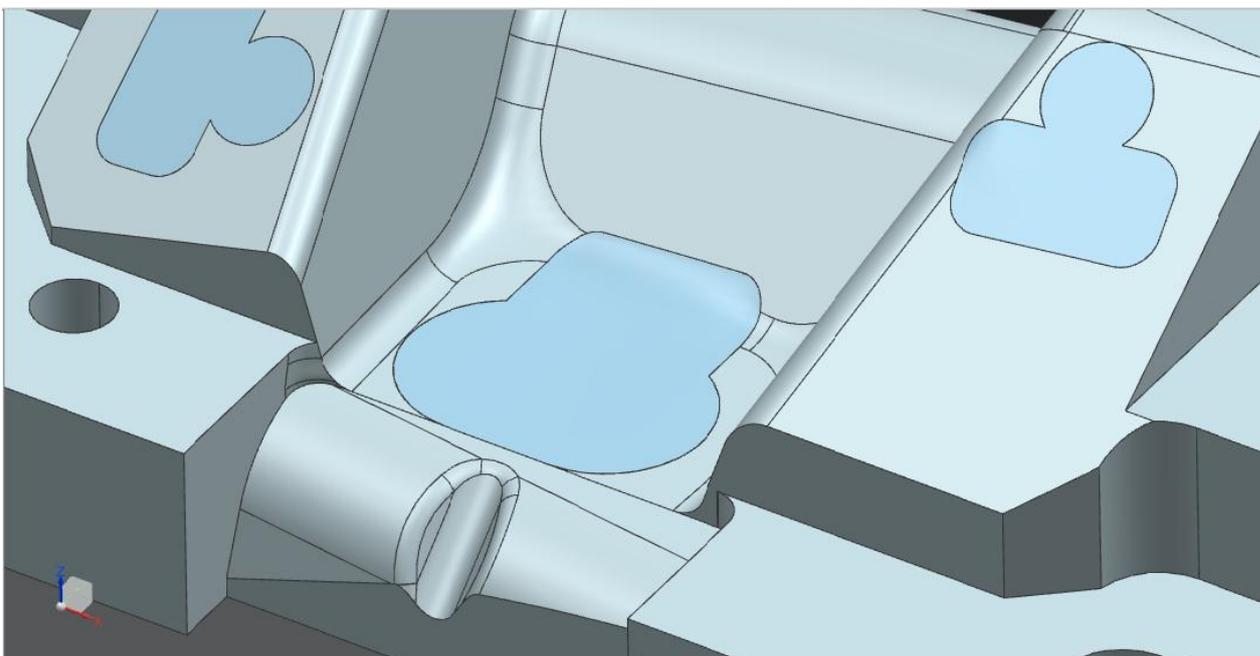


Рисунок 2.1.1. - Совмещение в одной детали различных поверхностей.

На рисунках 2.1.2 и 2.1.3 показаны электронные модели типовых деталей, включённые в исследуемую группу.

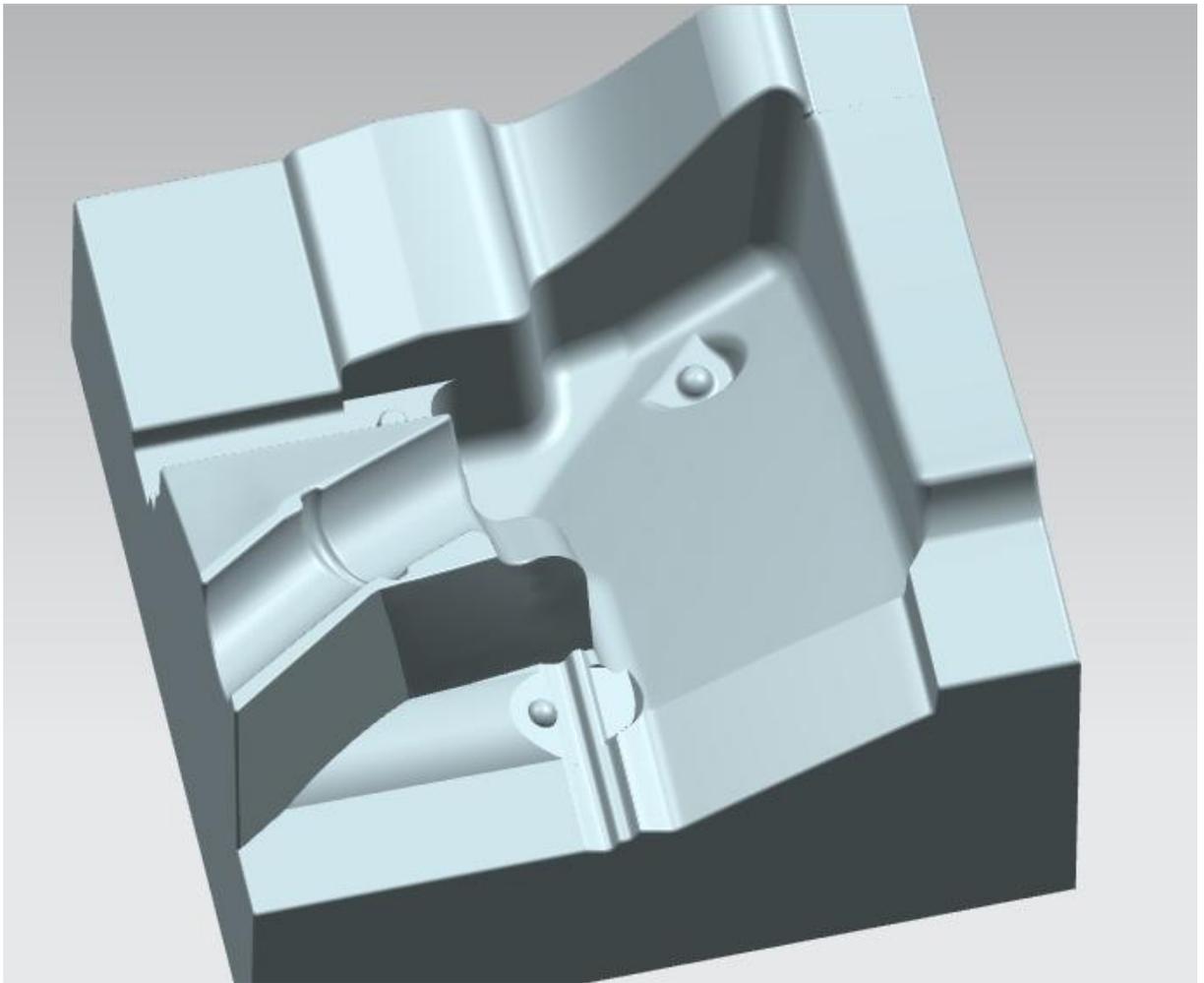


Рисунок 2.1.2 – Одна из деталей типовой группы

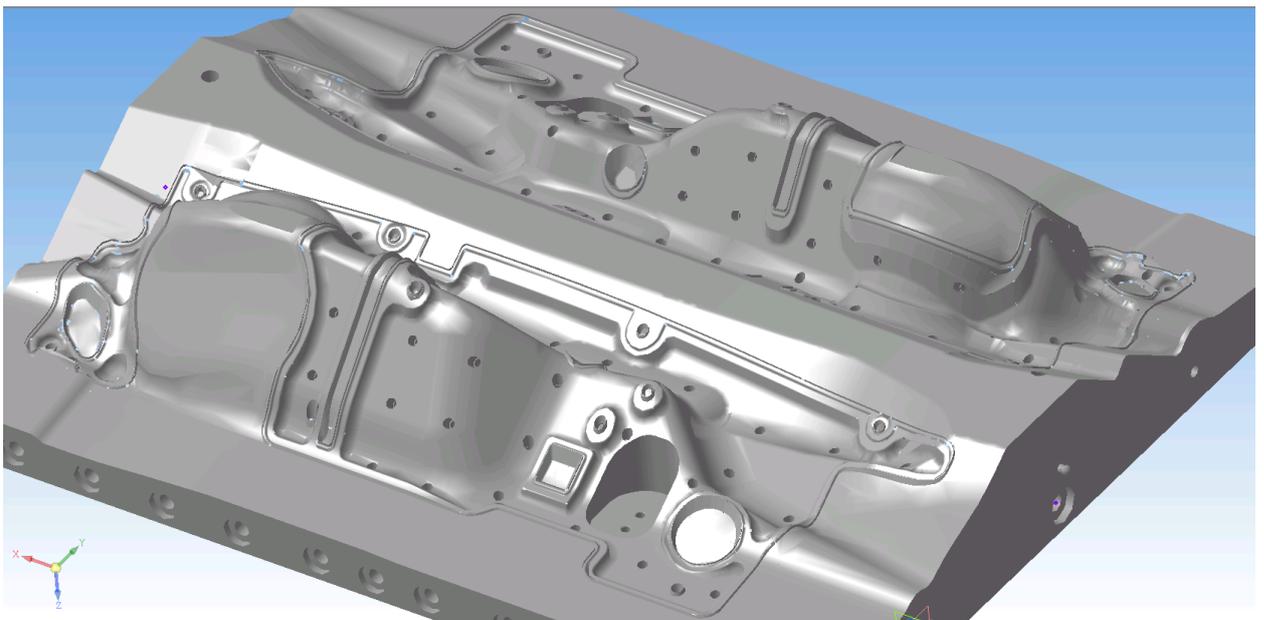


Рисунок 2.1.3 – Пример типовой детали

Некоторые из этих особенностей обусловлены необходимостью производства цельных матриц и пуансонов, т.е. без разделения их на секции. Малые допуски на сложных элементах влекут за собой проблемы с их контролем. Большие перепады высот формообразующих поверхностей создают определённые сложности в их механической обработке, также как и совмещение разных типов поверхностей.

Таким образом, результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы для группы деталей, обладающих перечисленными признаками.

2.2 Оборудование, используемое при обработке деталей типа матрица

и пуансон

Оборудование, используемое для обработки деталей анализируемой группы, включает следующие типы станков:

1. Плоскошлифовальный станок.
2. Вертикально-фрезерный станок.
3. Координатно-шлифовальный станок;
4. Кластер 3-х осевых станков с ЧПУ фрезерной группы:

А) фрезерный станок с ЧПУ «Kafo» на контроллере Heidenhain, имеющий высокую производительность на чистовых операциях, ввиду высокооборотистого шпинделя (до 20 тыс. об/мин.);

Б) фрезерный станок с ЧПУ «Hermle» на контроллере Heidenhain, с количеством оборотов шпинделя до 10 тыс. об/мин.;

В) фрезерный станок с ЧПУ «MaHo», с низкооборотистым шпинделем, применимость которого оправдана на вспомогательных операциях.

2.3 Программное обеспечение процесса обработки

Использование программного обеспечения технологом обычно ограничивается САМ-системой, приобретенной его работодателем. Пройдя через постпроцессор, программа обработки представляет из себя машинный код определенного синтаксиса, «понятный» соответствующему станку. Далее, управляющая программа загружается на станок и, по возможности, проходит последнюю процедуру верификации. Так называемые «стойки» Heidenhain, позволяют достаточно наглядно провести виртуальную обработку по загруженной УП и помочь наладчику или фрезеровщику правильно распределить деталь и оснастку на станке.

2.4 Анализ способов обработки поверхностей

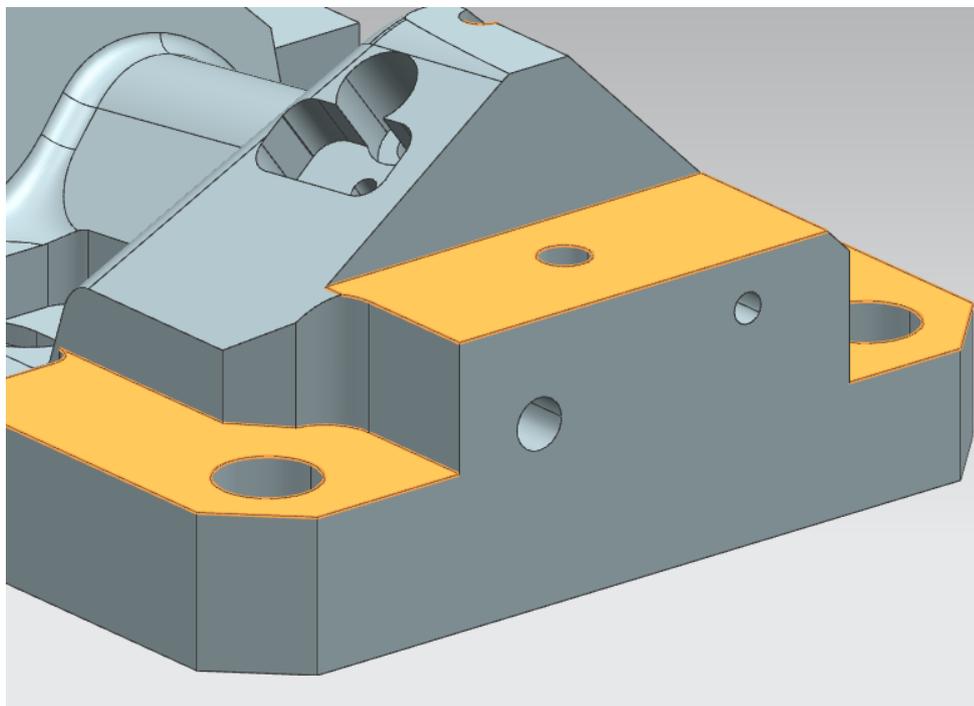
Как было сказано ранее, детали типа пуансон и матрица имеют ряд конструктивных особенностей. Различные поверхности таких деталей требуют к себе отдельного внимания со стороны технолога. Приведем краткий анализ методов обработки основных элементов матриц и пуансонов на станках фрезерной группы с ЧПУ.

1) Плоские участки (рисунок 2.4.1.).

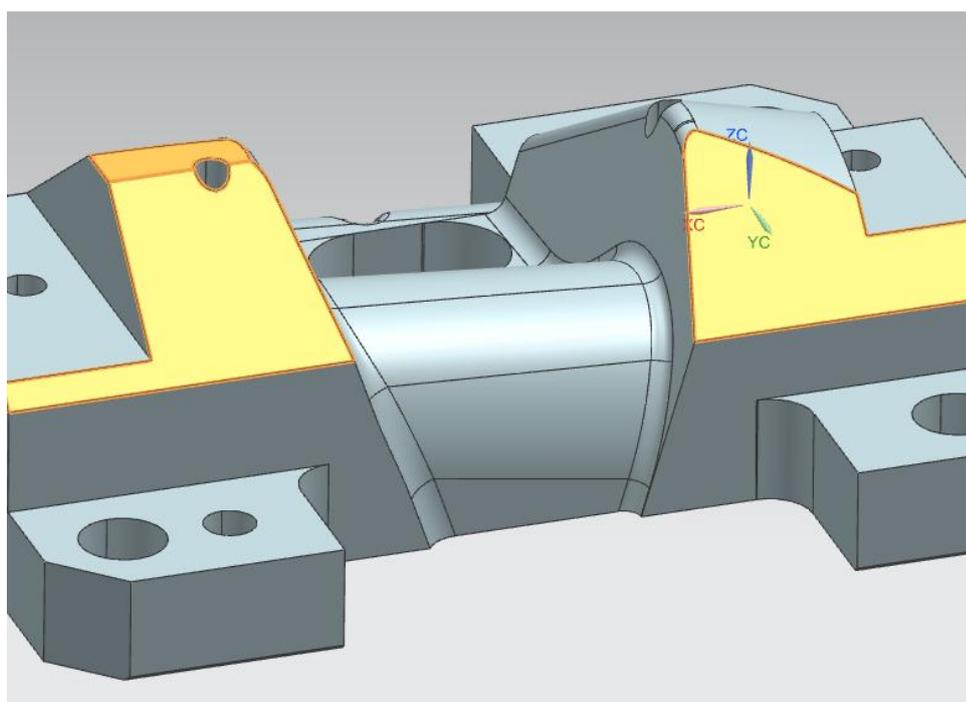
Одни из самых простых поверхностей детали. Чаще всего обрабатываются высокопроизводительными сборными фрезами максимального диаметра (а). Если эти поверхности матрицы или пуансона являются формообразующими, то их шлифуют на шлифовальном станке, добиваясь необходимой точности и шероховатости (б). Если же данные поверхности служат технологическими базами, то необходимые шероховатость и посадки возможно получить и на фрезерном оборудовании.

В условиях сопряженных поверхностей, часто необходима доработка угловых участков перехода одной поверхности в другую меньшим по диаметру инструментом. Самые большие сложности возникают при

сопряжении плоских поверхностей с другими, сложными криволинейными поверхностями. В таких случаях оказывается невозможным использование крупного инструмента и шлифовального оборудования, а иногда может потребоваться трудоемкая слесарная доработка.



а



б

Рисунок 2.4.1. - Плоские поверхности: а – свободные, б – формообразующие.

2) Вогнутые поверхности.

Вогнутые поверхности на исполнительных частях матриц и пуансонов имеют свои сложности в обработке. Даже при их относительно большой глубине, такие поверхности обрабатываются на станках с ЧПУ даже на черновых операциях. Это повышает себестоимость детали.

Методы обработки таких поверхностей могут быть следующими:

А) Обработка по типу «карман». Часто, в условиях закрытых областей, в оптимальной точке кармана сверлится отверстие, из которого инструмент начинает послойную обработку по траекториям эквидистантным стенкам. Либо, если карман является «открытым», врезание инструмента осуществляется горизонтально (рисунок 2.4.2).

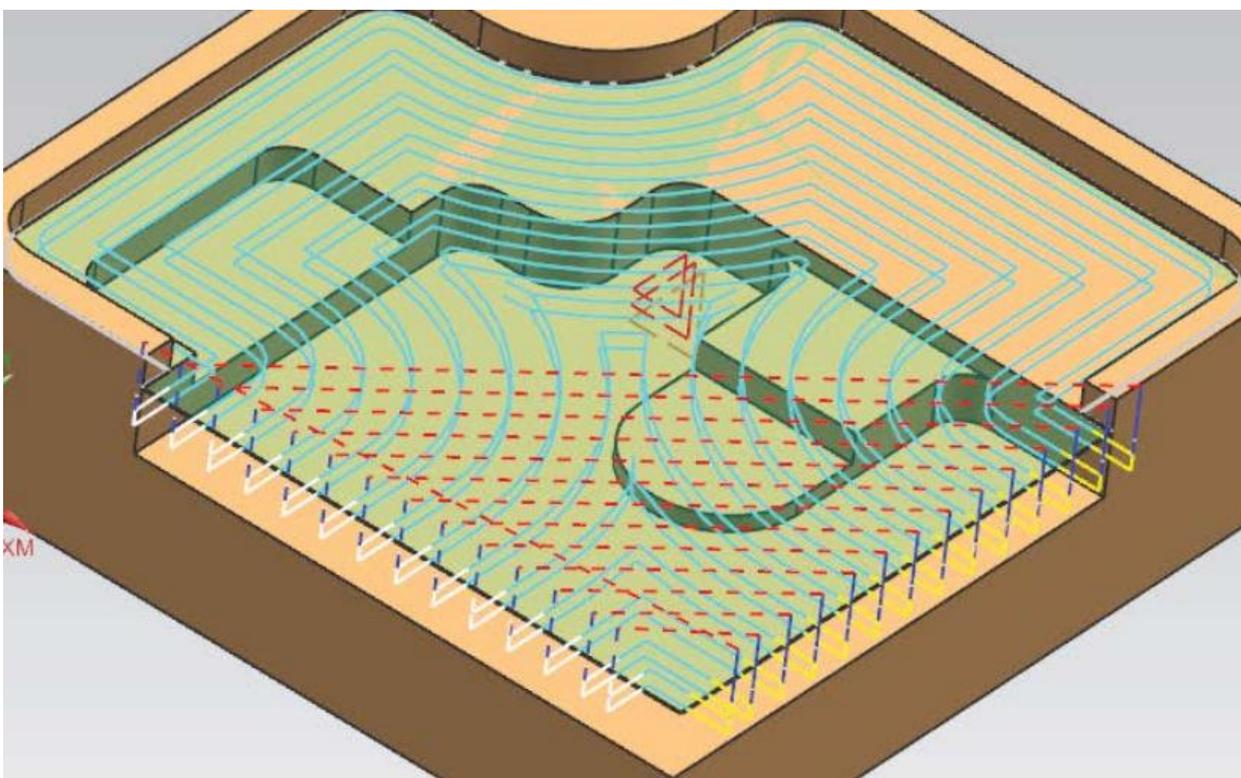


Рисунок 2.4.2 - Обработка кармана

Для чистовых операций обработки карманов сложной формы характерна обработка по спирали (рисунок 2.4.3).

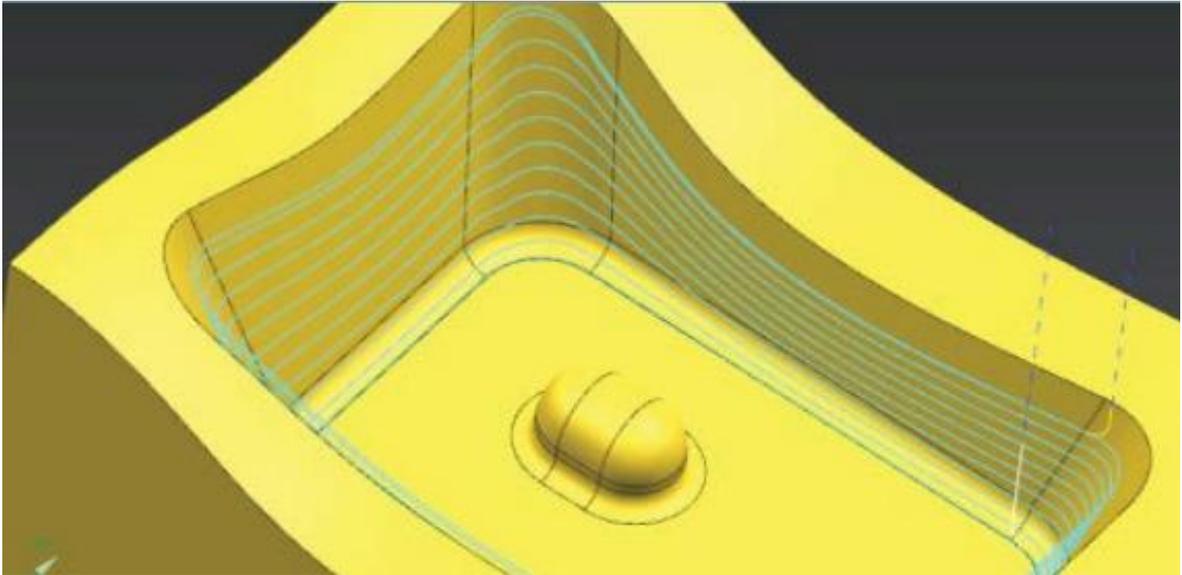


Рисунок 2.4.3– Обработка закрытого кармана

Б) Обработка с погружением инструмента. Выполняется радиусными (сферическими) фрезами по траекториям подобным «штрихам» либо эквидистантным управляющей геометрии. Специфика метода заключается в том, что высокопроизводительный инструмент погружается на всю или значительную глубину впадины, работая по большей части боковыми режущими кромками. В случае «штриховки», траектории резания в таких операциях имеют вид прямой линии в горизонтальном сечении, а в вертикальном - повторяя контур впадины (рисунок 2.4.4). Подобная обработка отличается высокой производительностью удаления материала на черновых операциях, однако требует достаточно дорогого цельного инструмента.

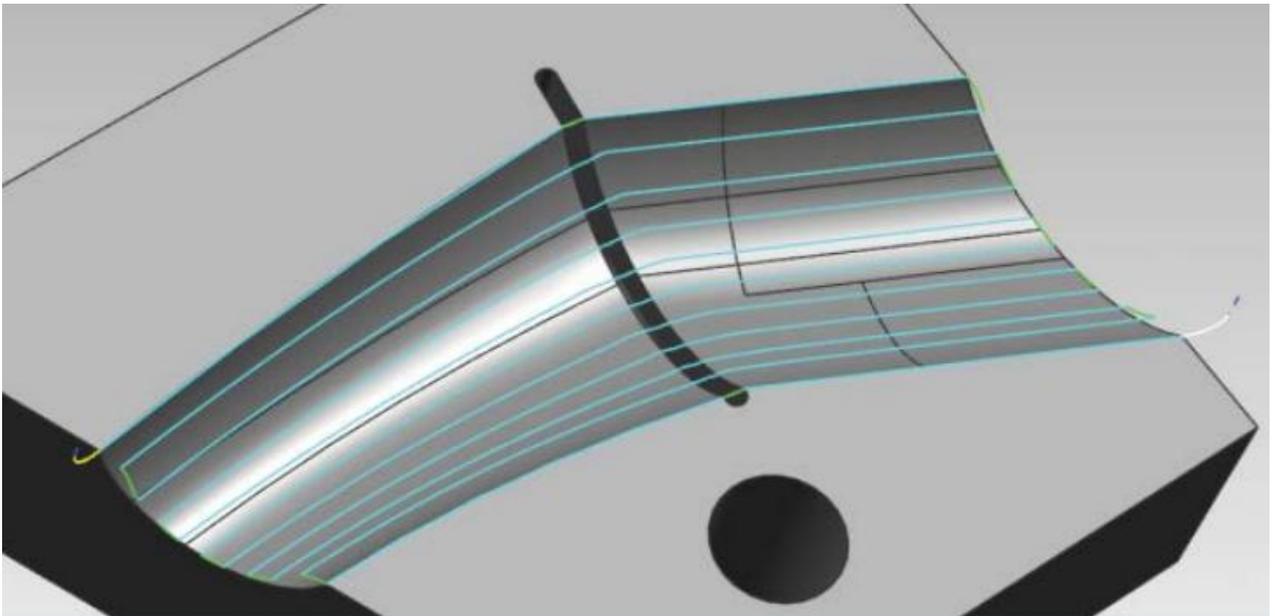


Рисунок 2.4.4 - Обработка с погружением инструмента

3. Выпуклые поверхности.

Основными сложностями в обработке выпуклых поверхностей, так же как и вогнутых, является частая невозможность их черновой обработки на универсальных станках. Большое количество снимаемого материала на операциях фрезерования с ЧПУ автоматически повышает себестоимость детали.

Черновая обработка на оборудовании с ЧПУ выпуклых поверхностей чаще всего представляет послойную обработку по эквидистанте радиусными сборными фрезами, либо фрезами с фаской.

Методы чистовой обработки могут быть следующими:

А) Обработка по спирали (1) или по Z-уровням(2) (рисунок 2.4.4).

Оптимальным методом для чистовых операций обработки выпуклых поверхностей считается обработка по спирали. Такой способ обработки минимизирует количество врезаний инструмента и обеспечивает постоянство нагрузок резания. Это позволяет применять высокоскоростную обработку.

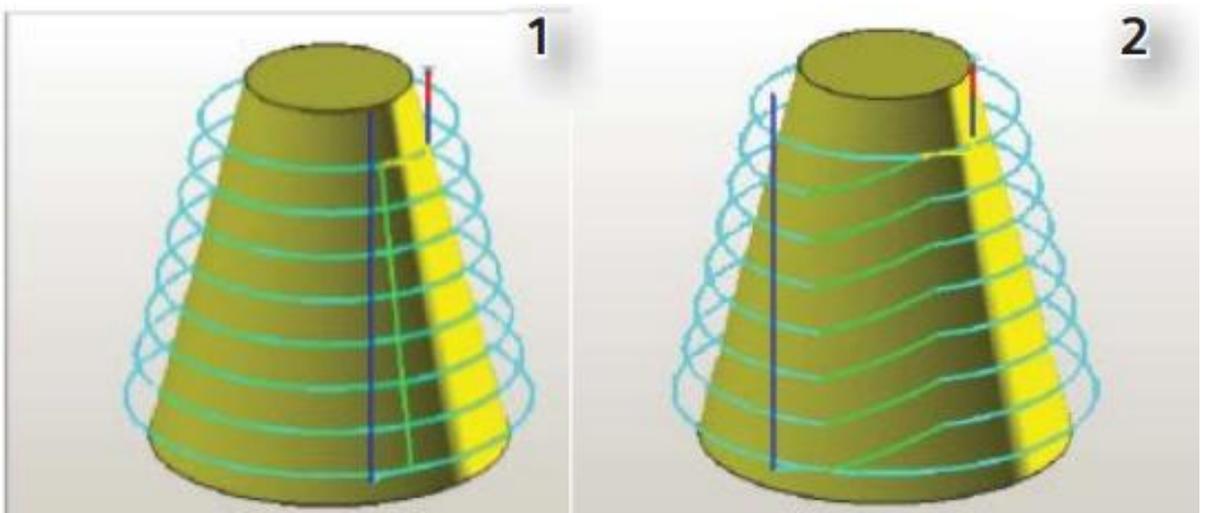


Рисунок 2.4.5- Обработка по спирали (1) и по Z-уровням(2).

Б) Обработка «штрихами» (прямолинейными участками).

Суть данного метода схожа с обработкой с погружением инструмента вогнутых поверхностей – инструмент движется по прямой, огибая по высоте контур детали (рисунок 2.4.6). Однако в данном случае не обязательно применять цельные фрезы, т.к. глубина резания не велика. Вместо них можно использовать более дешёвые фрезы со сменными пластинами.

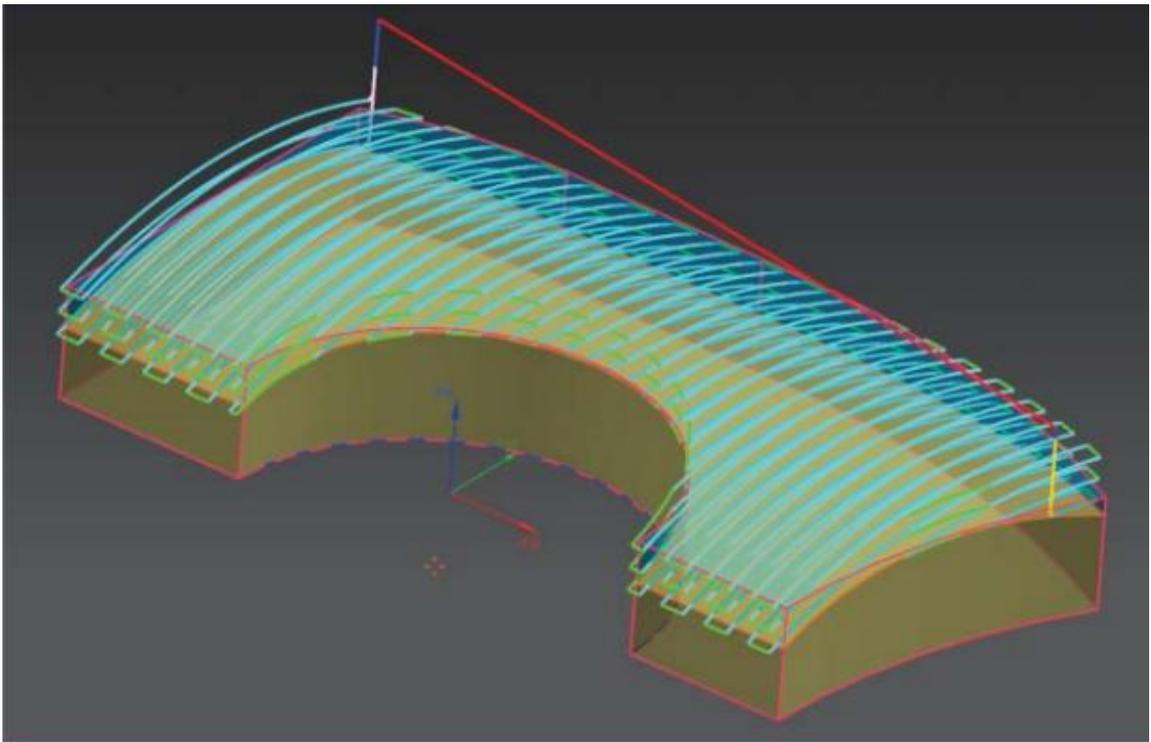


Рисунок 2.4.6- Обработка «штрихами»

Таким образом, проведенный анализ позволил выделить в отдельную группу типовые детали матриц и пуансонов, отвечающие установленным границам исследования, а так же определить типовые методы обработки элементов таких деталей.

2.5 Существующие методы оптимизации

Понятие оптимума включает в себя определение наиболее благоприятных условий протекания того или иного процесса. Соответственно оптимизация – процесс выбора наилучшего решения, с учётом всех известных условий и ресурсов, влияющих на технологический процесс. Как говорилось ранее, техническая оптимизационная задача является задачей построения математической модели, содержащей критерии оптимизации и ограничения, выраженные математическими уравнениями. Математические уравнения разрабатываются путём теоретического и экспериментального моделирования [4].

Любой технологический процесс можно представить в виде сложной системы из входных, управляющих и выходных параметров. Входными параметрами в исследуемом ТП являются характеристики заготовки. Выходные параметры – это характеристики детали на конечном этапе технологического процесса, затраты на её производство и т.д. Роль управляющих параметров играют режимы обработки, определение операций и их последовательности, характеристики инструмента, оборудования и возможности САМ-системы.

Таким образом, математическую модель процесса обработки деталей типа пуансон и матрица можно представить в виде комплекса элементов E и соотношений между ними R , образующие сложную систему[5]:

$$S = E; R . \quad (1)$$

Из такого определения системы видна её иерархическая структура, что позволит из главенствующей структуры, выделить подсистемы и исследовать их по отдельности. Входящие в систему элементы, при ближайшем рассмотрении, можно разделить на качественные (параметры, отражающие структуру системы) и количественные (геометрия заготовки, инструмента, режимы обработки и др.). Соответственно и оптимизация технологического процесса будет иметь два направления – структурная и параметрическая.

Структурная оптимизация обеспечивает оптимальный выбор оборудования, оснастки, приспособлений, инструментов, последовательности переходов и т.д. [4]. Критерием такой оптимизации может являться штучное время, коэффициент многостаночного обслуживания и др.

Параметрическая оптимизация обеспечивает оптимальные значения режимных параметров (режимы резания, износ инструмента и др.). Именно при реализации т.н. внешней параметрической оптимизации, используется системный подход и математическое моделирование.

2.6 Выводы

На данном этапе можно конкретизировать основную цель оптимизации как: определение, при заданных входных параметрах, таких методов и режимов обработки, которые с минимальными затратами приведут к необходимому результату. В качестве задач выступает целый ряд мероприятий, таких как: выбор критериев, определение множества их возможных значений; выбор анализируемого набора выходных параметров; установление функциональных зависимостей между ними при фиксированных значениях неуправляемых параметров; выделение целевой функции; назначение диапазонов возможных значений выходных параметров [5].

Глава 3. Структурная оптимизация процессов механической обработки

3.1 Анализ типовой детали

Для описания математической модели технологического процесса производства рассматриваемых деталей необходимо в полной мере определить характерные входные параметры. В качестве типовой детали примем деталь типа пуансон, показанной на рисунке 3.1.1. Данная деталь имеет все типовые характеристики группы деталей описанных в разделе 1.5.

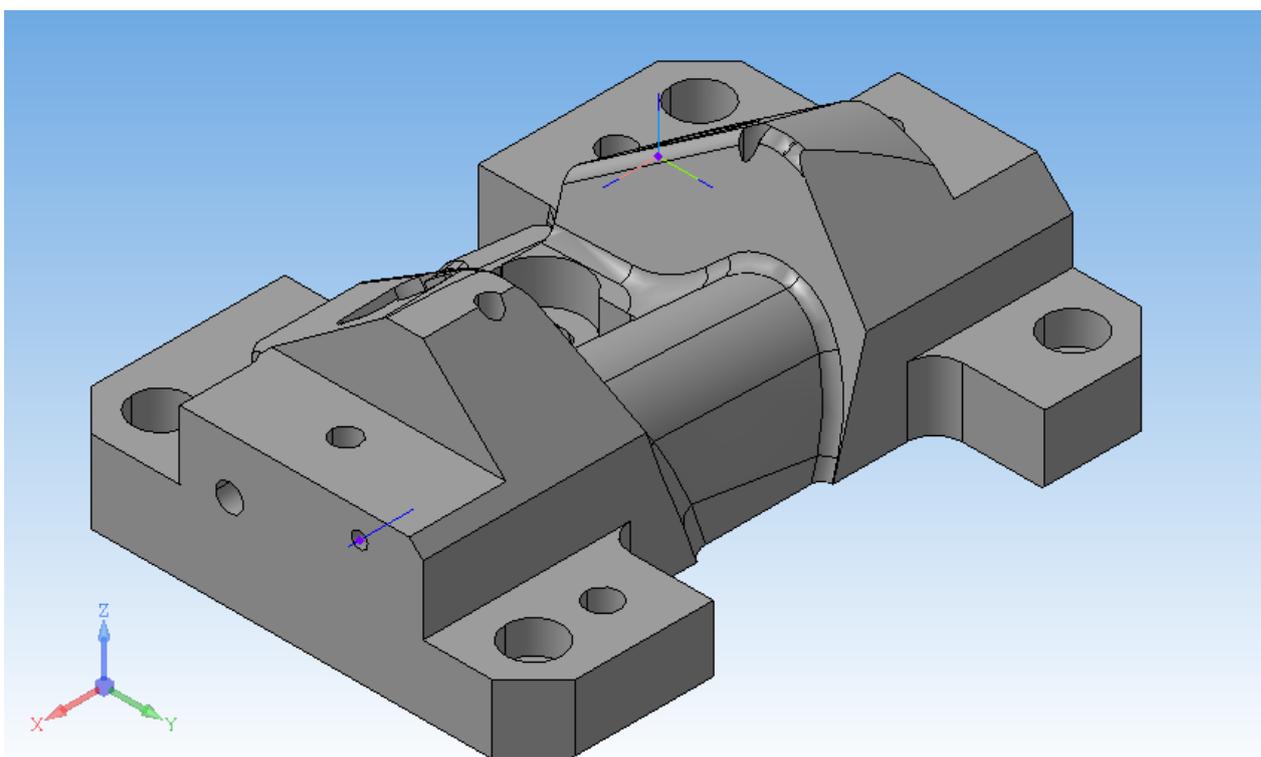


Рисунок 3.1.1 - Вид типовой детали в CAD-системе

Данная деталь работает в сборе со штампом и имеет ряд конструктивных особенностей, служащих для правильной работы штампа. Основная задача детали – передача усилия от штамповочного пресса на листовую заготовку, в процессе которого, заготовка принимает форму рабочего инструмента.

Основные конструктивные особенности детали пуансон (рисунок 3.1.2):

- 1) отвесные участки детали, создающие большой перепад высот;
- 2) сложные формообразующие поверхности, переходящие в плоские;
- 3) малые радиуса сопряжений поверхностей.

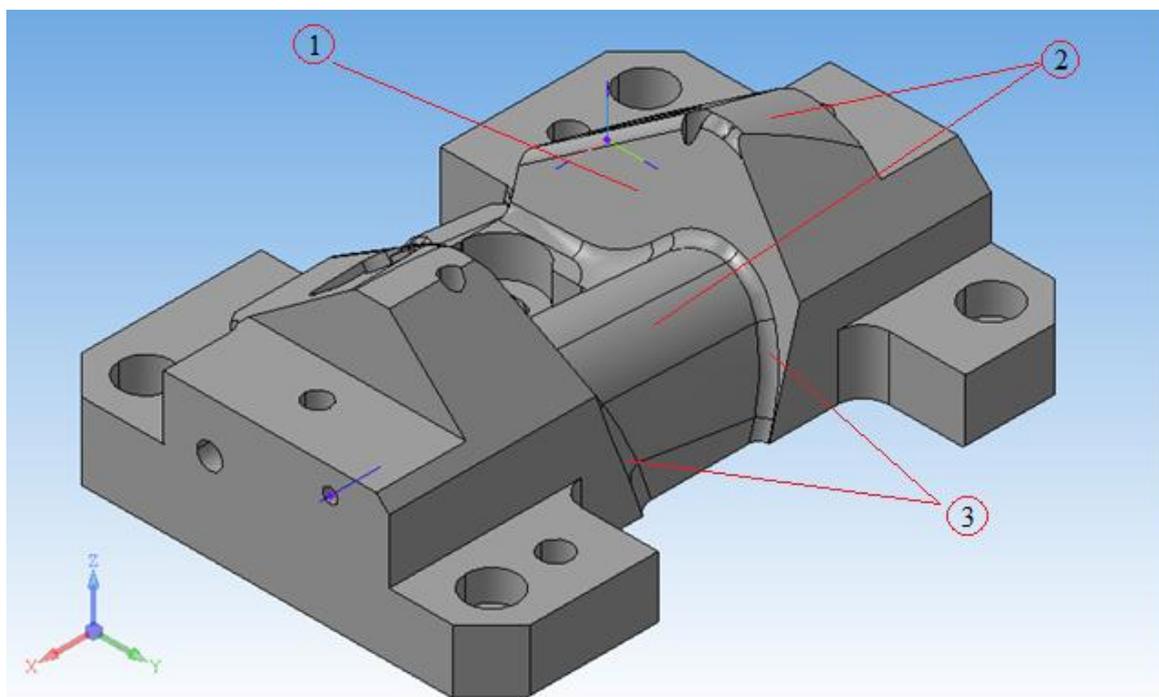


Рисунок 3.1.2- Основные конструктивные особенности детали пуансон

Т.к. формообразующие поверхности пуансона напрямую контактируют с заготовкой, такие параметры как точность и шероховатость этих поверхностей имеют ключевое значение в достижении высокого качества штампуемых деталей. Из-за циклического характера работы штампа можно определить, что формообразующие пуансоны и матрицы работают в условиях переменных нагрузок. В связи с этим, как видно из чертежа (приложение 1), деталь имеет твёрдость поверхности в диапазоне 55-61HRC. На рисунке 3.1.3 представлен чертёж данной детали.

Материал детали-сталь X12МФ – довольно часто используемая инструментальная штамповая сталь для изготовления матриц и пуансонов сложной формы и их секций для вырубных и кузовных штампов.

Химический состав: углерода 1,65-1,75%, хром 11-12,5%, молибдена и ванадия до 1%, остальное железо и низкий процент примесей. Твёрдость HB255МПа, предел прочности на растяжение $\sigma = 710$ МПа [7]. Сталь до термообработки поддается обработке резанием, как быстрорежущим инструментом ($K_{Уб.ст.}=0,3$), так и твердосплавным ($K_{УТВ.сп.}=0,8$), после – только твердосплавным.

Рассматриваемый тип деталей используется при холодной штамповке, что означает относительно невысокие температуры работы формообразующих частей штампа.

В таблице 3.1.3 представлена классификация поверхностей типового пуансона. Номера поверхностей указаны на технологическом эскизе (рисунок 3.1.4). Исполнительные поверхности сложной формы выделены голубым цветом, нижняя плоскость детали обозначена №15.

Таблица 3.1.4 – Классификация поверхностей пуансона

Вид поверхности	Номер поверхности
Исполнительные поверхности	8,9
Основные конструкторские базы	11,15
Вспомогательные конструкторские базы	1,2,3,4,7,10,12
Свободные поверхности	5,6,13,14

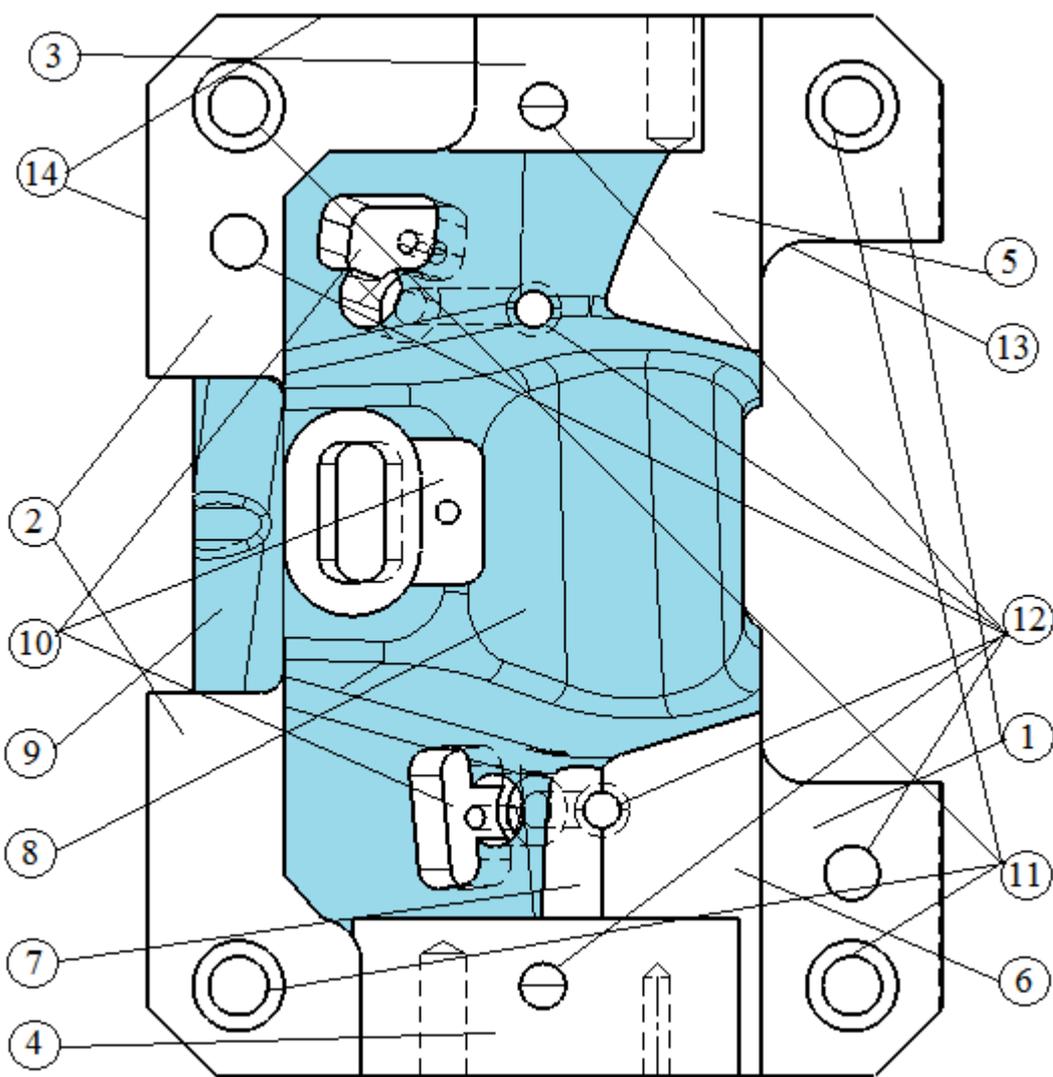


Рисунок 3.1.5- Обозначение поверхностей

3.2 Структурная оптимизация технологического процесса

Оптимизация ТП в большей степени относится к оптимизации конкретных частей технологического процесса. Общий алгоритм (или типовой ТП) кардинальным изменениям, обычно, не подвергается. Результаты структурной оптимизации, по своей значимости, превосходят результаты параметрической оптимизации. Правильная структура ТП, распределение припусков и технико-экономический расчёт метода получения заготовки способны упростить и уменьшить последующую механическую обработку, которая принимает на себя большую часть себестоимости детали.

В наиболее общем виде задачу структурной оптимизации можно сформулировать как задачу выбора наилучшей структуры. Для этого необходимо наложить определённые требования на совокупность выполняемых операций и ввести некоторые критерии предпочтения одной структуры другой. Другими словами, множеству операций, которые необходимо выполнить, нужно построить множество структур функционала, допустимых для этих операций. Так же, необходимо ввести постоянные технические ограничения, относительно которых и будет определяться функциональное множество[5].

Таким образом, задача выбора оптимальной структуры ТП в общем виде состоит в поиске такой структуры, которая наилучшим образом выполняла бы некоторую заданную совокупность функций при заданных условиях функционирования:

$$\max L S = \max_i (\sum_j l_{ij} - C_i), \quad (2)$$

где l_{ij} – эффективность выполнения объектом i -й операции; C_i – затраты на i -й элемент.

На начальном этапе технологический процесс можно представить в упрощённом (укрупнённом) виде (таблица 3.2.1).

В исследовании не будут участвовать такие операции как «Термическая» и «Слесарная». Рассмотренный математический подход будет применён для решения следующих задач оптимизации:

1. Выбор заготовки и методов её изготовления.
2. Выбор маршрута обработки.
3. Выбор оборудования;
4. Определение режущего инструмента.

Таблица 3.2.1 - Укрупнённый технологический процесс

Номер операции	Суть операции	Оборудование
005 Заготовительная	Отрезать заготовку	Отрезной станок
010 Черновая фрезерная	Фрезеровать необходимые поверхности с припуском	Универсально-фрезерный станок
015 Черновая фрезерная с ЧПУ	Фрезеровать необходимые поверхности по УП с припуском	Фрезерный станок с ЧПУ
020 Термическая	Произвести термическую обработку	
025 Шлифовальная	Шлифовать базовые поверхности	Шлифовальный станок, координатно-шлифовальный станок
030 Чистовая фрезерная	Фрезеровать необходимые поверхности начисто	Универсально-фрезерный станок
035 Чистовая фрезерная с ЧПУ	Фрезеровать необходимые поверхности по УП	Фрезерный станок с ЧПУ
040 Слесарная	Доработать необходимые поверхности	

3.3 Выбор вида заготовки и метода её изготовления

Выбор заготовки – важный этап технологического проектирования, который во многом определяет себестоимость детали. Необходимо определить наиболее рациональный вид заготовки, нахождение припусков на механическую обработку поверхностей, установить необходимую точность изготовления заготовки.

Обычно, производство делят на три типа: единичное, серийное и массовое. Количественной характеристикой типа производства является коэффициент закрепления операций, под которым понимается отношение

числа всех различных технологических операций подлежащих к выполнению в определённый срок, к числу рабочих мест [8]. От данного коэффициента так же зависит форма производства (групповая или поточная). Однако в случае производства штампов и пресс-форм, в соответствии с приведённой классификацией, производство является единичным. Для таких случаев коэффициент закрепления операций не регламентируется. Поэтому, определение типа производства не является необходимым, а производству будет присущ высокий уровень концентрации операций.

В качестве заготовок для производства формообразующих частей штампов обычно используют заготовки кубической формы либо фасонные заготовки. Разницы в этих типах заготовки практически не наблюдается. Также заготовки для штамповой оснастки получают литьём.

Заготовки, полученные литьём, отличаются тем, что качество и стойкость получаемых деталей возрастает, по причине направленной кристаллизации металла при литье, его повышенной чистоты, плотности, и отсутствия ликвационных дефектов. Так же преимуществом является форма заготовки близкая к форме детали, что снижает объём механической обработки. Отрицательным показателем отливок считается повышенная цена и вероятность отсутствия заменителей стали с необходимыми литейными характеристиками.

Заготовки кубической формы являются более дешёвыми, однако отличаются высоким уровнем обработки материала, подвергаемого выборке при механической обработке, т.е. низким коэффициентом использования материала.

На данном этапе, целевой функцией является минимальная себестоимость заготовки:

$$F(C_{\text{заг}}) \rightarrow \min \quad (3)$$

Себестоимость заготовки складывается из нескольких составляющих:

$$C_{\text{заг}} = C_{\text{мат}} * Q - C_{\text{отх}} Q - q + C_{\text{пер}}. \quad (4)$$

где

$C_{\text{мат}}$ – стоимость одного килограмма материала, руб./кг;

$C_{\text{отх}}$ – стоимость отходов, руб./кг;

$C_{\text{пер.}}$ – переменные затраты.

В данной целевой функции такие параметры, как переменные затраты (заработная плата рабочих, амортизация оборудования и инструмента и др.), не поддаются оптимизации, т.к. зависят от конкретных условий производства заготовок. Однако, этот параметр, по сути, отражает стоимость всех работ производимых предприятием при производстве данной заготовки и должен быть учтён в процессе оптимизации как постоянная величина, привязанная к конкретному типу получения заготовки.

Необходимо так же учесть то, что минимизация себестоимости заготовки не всегда приводит к оптимальному выбору. В некоторых случаях становится важно минимизировать последующую механическую обработку. Особенно это касается деталей со сложными поверхностями, создающими глубокие впадины и полости, которые значительно увеличивают черновую механическую обработку. Задача оптимизации на этом этапе сводится к минимизации излишнего материала на заготовке, подвергаемого механической обработке.

Согласно чертежу (приложение 1) габариты типовой детали 235x135x85мм. При изготовлении детали из кубической заготовки, её габариты должны быть больше на величину припуска, закладываемого под механическую обработку тех или иных поверхностей. Наиболее близко к границам заготовки расположены поверхности №7,14,15. В соответствии с чертежом детали поверхности 14 и 15 имеют высокий допуск, а значит по высоте заготовка должны превышать размеры детали на 2-3 мм. Поверхности 3,4,5,6 являются свободными, однако они должны подвергнуться механической обработке согласно заявленной шероховатости для свободных поверхностей, что так же требует увеличения ширины и длины заготовки на 1-2 мм. Не сложно рассчитать массу заготовки кубической формы:

$$V_k = 235 + 2 * 2 * 135 + 2 * 2 * 85 + 3 * 2 = 3023.11 \text{ мм}^3$$

$$q_k = V_k * p = 3023.11 * 0.079 = 23732 = 23.7 \text{ кг}$$

где

V_k, m_k – объём и масса кубической заготовки,

p – плотность стали X12МФ.

Согласно электронной модели масса детали равна 10,9кг. Очевидно, что масса удаляемого металла при механической обработке равна 12,8кг, что соответствует коэффициенту использования материала 0,45.

Согласно сведениям, полученным из ресурсов сети Интернет, стоимость стали X12МФ в г. Тольятти на 2017 год в среднем около 100 тыс. рублей за 1 тонну. Стоимость заготовки полученных габаритов соответственно 2280 руб. Стоимость отходов механической обработки при проектировании примем равной 10% от стоимости материала, что составит 128 рублей. Реализация отходов снизит стоимость заготовки до 2152 рублей.

Расчёт заготовки получаемой литьём затрудняется тем, что стоимость производства отливки возможно получить лишь после обращения в конкретное предприятие и получения от него коммерческого предложения. Однако, это не мешает определению необходимых параметров отливки. Для этого назначим припуски на механическую обработку и с помощью программных средств NXполучим модель отливки. Это позволит рассчитать коэффициент использования материала, а также поможет в определении типов и параметров механической обработки в дальнейшем.

По материалам справочной литературы [6] назначим припуски на механическую обработку поверхностей типовой детали типа пуансон в зависимости от допусков (таблица 3.3.1).

Согласно построенной электронной модели заготовки, её масса составит 11,4 кг (рисунок 3.3.2).

Таблица 3.3.1 – Припуски на механическую обработку

Номер поверхности	Допуски размеров, мм	Припуск, мм
-------------------	----------------------	-------------

Плоские свободные поверхности	$\pm 0,1$	0,8
Цилиндрические отверстия под направляющие колонки	+0,02	0,6
Формообразующие поверхности	$\pm 0,01$	0,6
Базовые плоскости	$\pm 0,01$	0,8

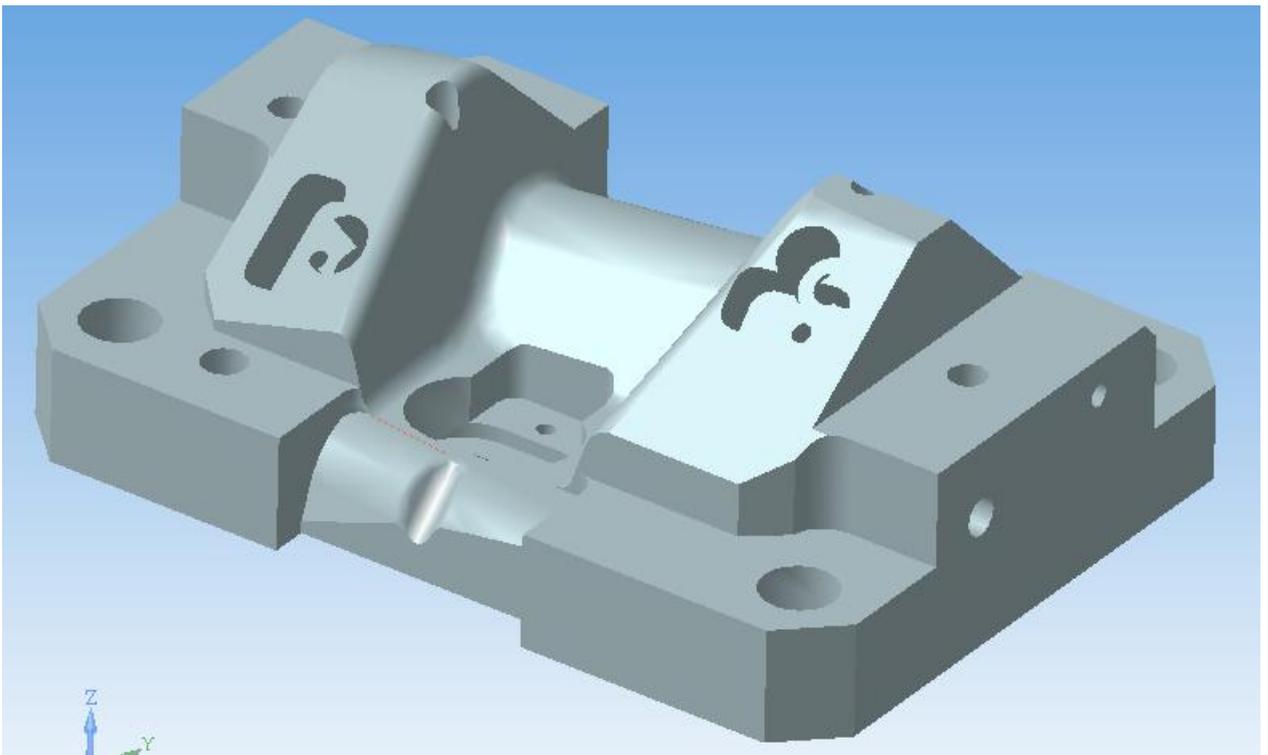


Рисунок 3.3.2- Вид заготовки в САD-системе

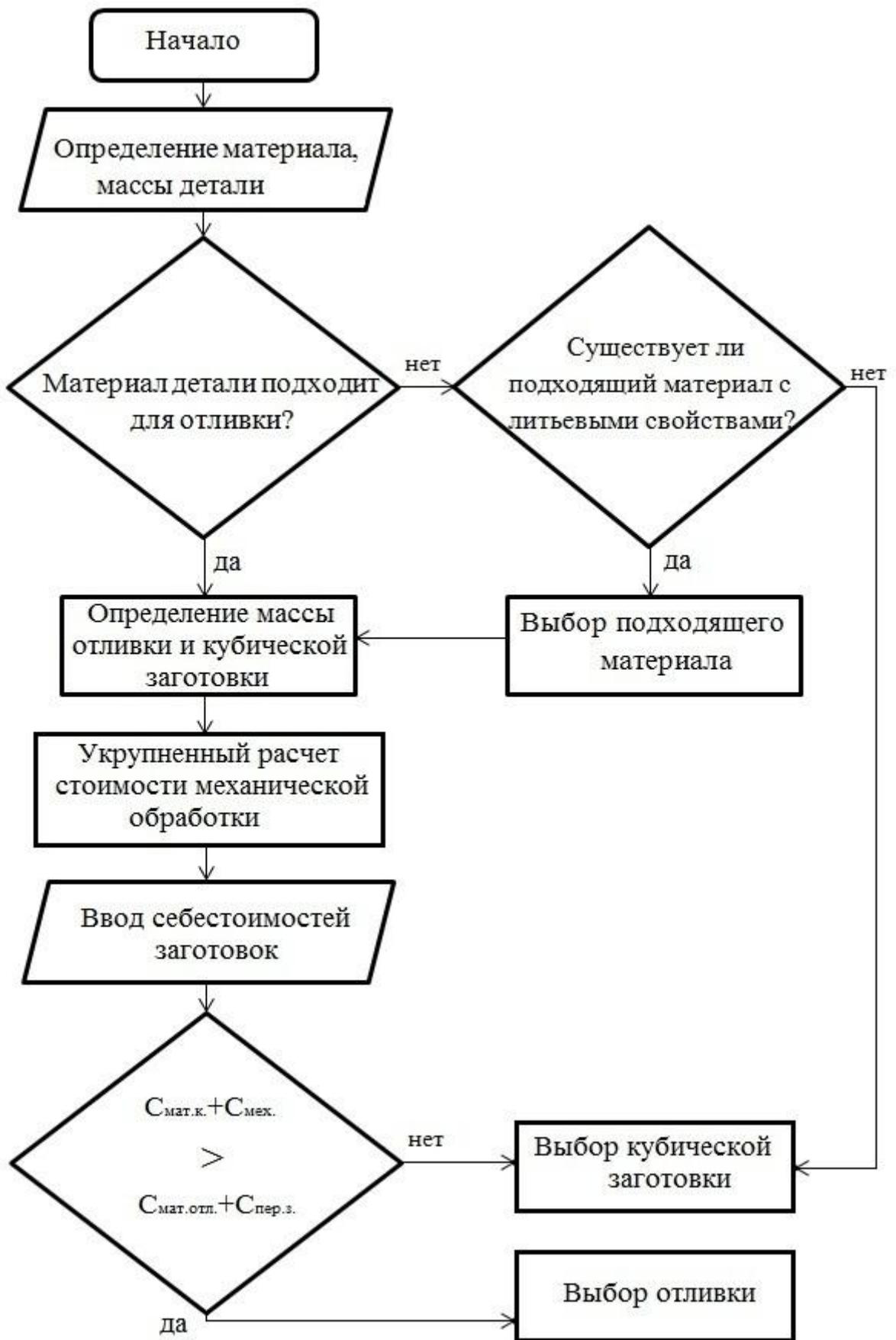


Рисунок 3.3.3- Алгоритм выбора метода получения заготовки

Процесс выбора оптимальной заготовки можно представить в виде следующего алгоритма, представленного на рисунке 3.3.3.

Данный алгоритм при его использовании позволит обосновать выбор типа заготовки, однако требует предварительного расчёта стоимости механической обработки. Стоит отметить, что на данном этапе основную роль играет черновая обработка, разницу в которой и определяет тип заготовки. Черновая обработка, в свою очередь, на этапе проектирования ТП рассчитывается достаточно быстро, в то время как расчёт чистовой обработки не требуется, ввиду её независимости от типа используемой заготовки.

Таким образом, достижение целевой функции при определении типа заготовки выполняется за счёт использования приведённого выше алгоритма. Работа данного алгоритма основывается на применении логических ограничений, позволяющих определить значения переменных структурной оптимизации, и как следствие тип необходимой заготовки.

3.4 Структурный анализ выбора типового маршрута обработки

Принятие рациональных и оптимальных технологических решений на всех этапах проектирования технологического процесса связано со значительными трудностями, так как структура технологического процесса не выражается в явном виде через известные исходные данные и в значительной степени зависит от множества условий технологического, организационного, экономического и производственного характера, описания которых отличаются большой сложностью [5].

Для маршрута изготовления той или иной детали характерна некая типовая схема, выражающаяся в дифференциации технологического процесса. К основным частям ТП относят: стадии обработки, этапы обработки, виды работ, типовые операции. Эти уровни ТП представляют друг для друга множества типа

$$MC_u \subset C_{u1}, C_{u2}, \dots, C_{un} , \quad (5)$$

где

M_{C_n} – множество стадий;

$C_{u1}, C_{u2}, \dots, C_{un}$ – стадии, этапы, виды обработки или операции.

При рассмотрении маршрута обработки относительно конкретных областей можно увидеть, что основные сведения по механической обработке содержат уточнённые переходы внутри типовых операций, что позволяет представить их в виде условной трудоёмкости и выразить общую трудоёмкость в виде суммы

$$M_{\Pi} = \Pi_{i1} + \Pi_{i2} + \dots + \Pi_{in}, \quad (6)$$

где

M_{Π} – общая трудоёмкость;

$\Pi_{i1}, \Pi_{i2}, \Pi_{in}$ – трудоёмкость обработки i -й поверхности детали.

Однако, для выбора оптимального маршрута обработки не достаточно учитывать трудоёмкость обработки поверхностей детали. Одним из главенствующих параметров здесь является стоимость обработки, зависящая от инструментальной оснастки и оборудования. Исходя из этой логики, максимальный объём материала, снимаемый в процессе обработки с детали, должен приходиться на высокопроизводительные виды металлообработки. В данном случае, к таковым относится фрезерование на универсально-фрезерных станках. Такие станки, при недостаточной точности обработки для чистовых операций, имеют высокую производительность на черновых операциях. Причиной этому служит высокая жёсткость системы станка при обработке крупными цельными или сборными фрезами. Глубина фрезерования при такой обработке, в зависимости от диаметра инструмента, может достигать 40 мм, а подача на зуб до 0,2 мм[10].

Таким образом, на данном этапе можно определить целевую функцию как:

$$C_{\text{черн.обр.}} \rightarrow \min, \quad (7)$$

где $C_{\text{черн.обр.}}$ – стоимость черновой обработки.

В качестве критериев выступают время обработки и суммарная стоимость используемого инструмента и времени рабочего:

$$S = s_{\text{инстр.}} + t_{\text{обр.}} \cdot K, \quad (8)$$

Рассмотрим технологический маршрут изготовления выбранного в качестве типовой детали пуансона, используемый на производстве ООО «ТЗТО» (рисунок 3.4.1). Черновая обработка заготовки по данному ТП производится на оборудовании с ЧПУ.

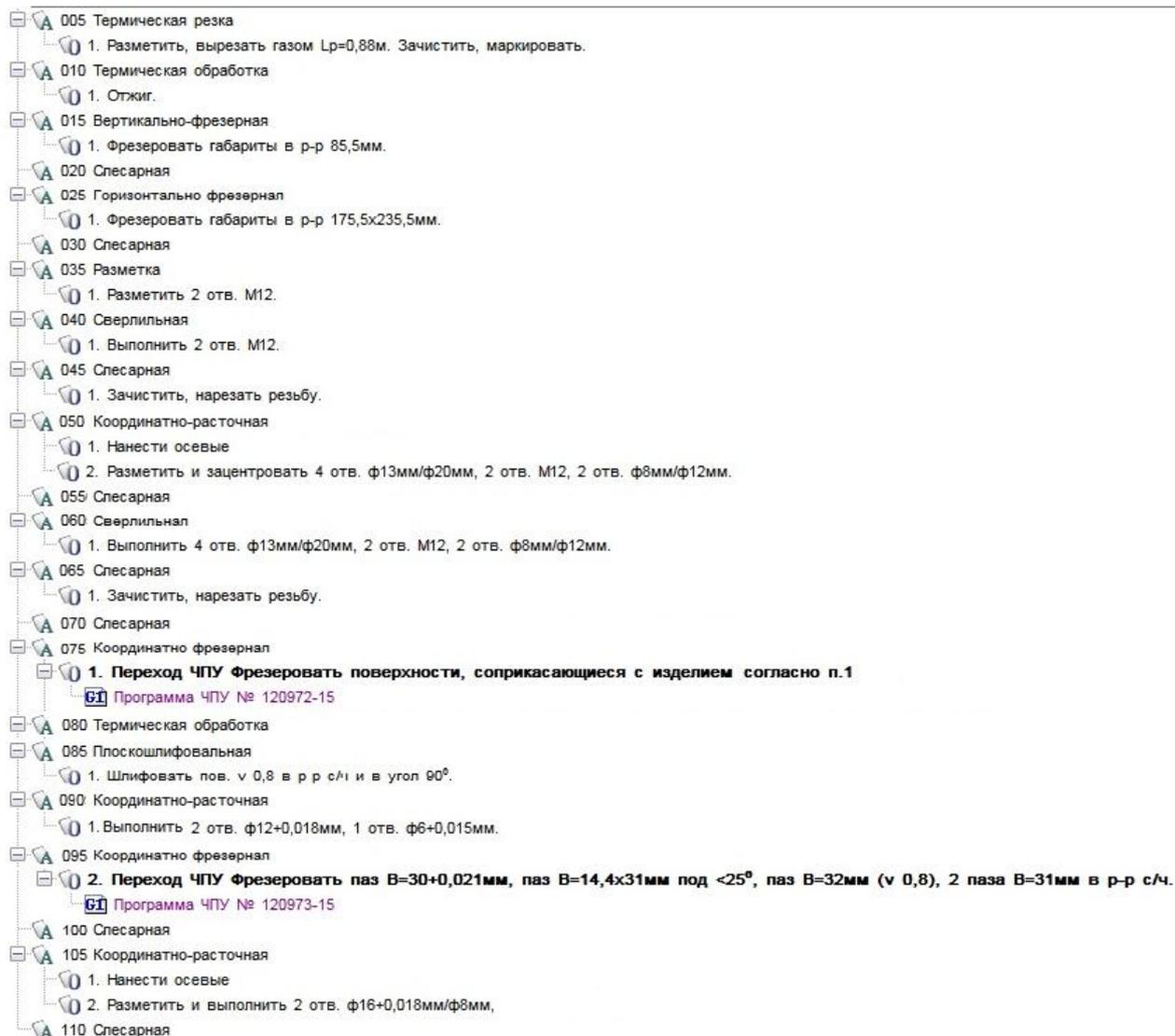


Рисунок 3.4.1- Используемый технологический маршрут (в САПР ТП)

В условиях обработки сложных поверхностей по типу рассматриваемой детали, для снижения доли обработки на станках с ЧПУ, часто используется такой метод, как фрезерование по разметке. Т.е. на

заготовке предварительно размечаются сложные контуры детали в разных проекциях. Основное требование при нанесении разметки – однозначность определения по ней участков, подвергаемых обработке на универсальном оборудовании. По такой разметке, станочник обрабатывает заготовку, оставляя на контурах разметки припуск, снимаемый на чистовых операциях. Такой подход снижает долю использования станков с ЧПУ, их более дорогой оснастки и инструмента. Рассмотрим оба варианта технологического процесса: с черновым фрезерованием по разметке на универсальном оборудовании и черновым фрезерованием на станке с ЧПУ. Основным параметром оптимизации, как и прежде, будет себестоимость конкретного перехода, выражающаяся во времени работы определённого станка и инструмента в течение маршрута обработки.

Для решения такой задачи необходимо создание полного проекта черновой обработки в САМ-системе SiemensNX9, выбранной в качестве типовой детали. На первом этапе произведём виртуальную обработку детали из цельного параллелепипеда, размеры которого указаны в разделе 2.4.

Разобьём всю черновую механическую обработку на этапы, каждый из которых состоит из последовательности переходов, порядок которых обусловлен технологическими факторами и особенностями обрабатываемой детали (таблица 3.4.2.). Так же, стоит отметить, что различные переходы могут допускать к использованию более одного режущего инструмента, что позволит оптимизировать черновую обработку относительно времени.

Разработаем управляющую программу для первого варианта черновой обработки первого перехода. Для удобства обозначим её «УП1». Руководствуясь таблицей, попробуем обработать все поверхности торцевой фрезой диаметром 60 мм и доработать плоские участки концевой фрезой диаметра 20 мм. На рисунке 3.4.3 показан вид траекторий полученной управляющей программы, а на рисунке 3.4.4 её верификация. Доработка плоских участков представлена на рисунке 3.4.5, и на рисунке 3.4.6 – общая

верификация УП1. Режимы резания для обеих управляющих программ представлены на рисунке 3.4.7.

После проверки траекторий в «Навигаторе операций» можно увидеть автоматически рассчитанное время обработки (рисунок 3.4.8). В сумме эти два перехода на ЧПУ оборудовании будут выполняться около 24 часов. Это значение является теоретическим, и заведомо можно сказать, что на практике обработка займёт несколько больше времени. Причиной этому неспособность учесть в полной мере кинематику станка, отсутствие расчётов времени на подготовку и смену инструмента, проводимые оператором измерения и т.д. Однако, эти величины не являются переменными и потому не могут быть оптимизированы, что позволяет ими пренебречь на этапе проектирования технологического процесса.

Таблица 3.4.2 – Этапы черновой обработки типовой детали

№ перехода	Вид обрабатываемых поверхностей	№ поверхностей	Используемый инструмент
1	Плоские поверхности	1,2,3,4	Вариант №1 - Торцевая сборная фреза D60 мм; - Сборная концевая фреза D20 мм.
			Вариант №2 - Торцевая сборная фреза D60 мм;
2	Группа трёхмерных поверхностей позволяющих обработку «по уровням»	5,6,7,8	- Торцевая сборная фреза D60 мм;

Продолжение таблицы 3.4.2			
3	Остальные поверхности, требующие снижения остаточного припуска перед термообработкой	8,9	

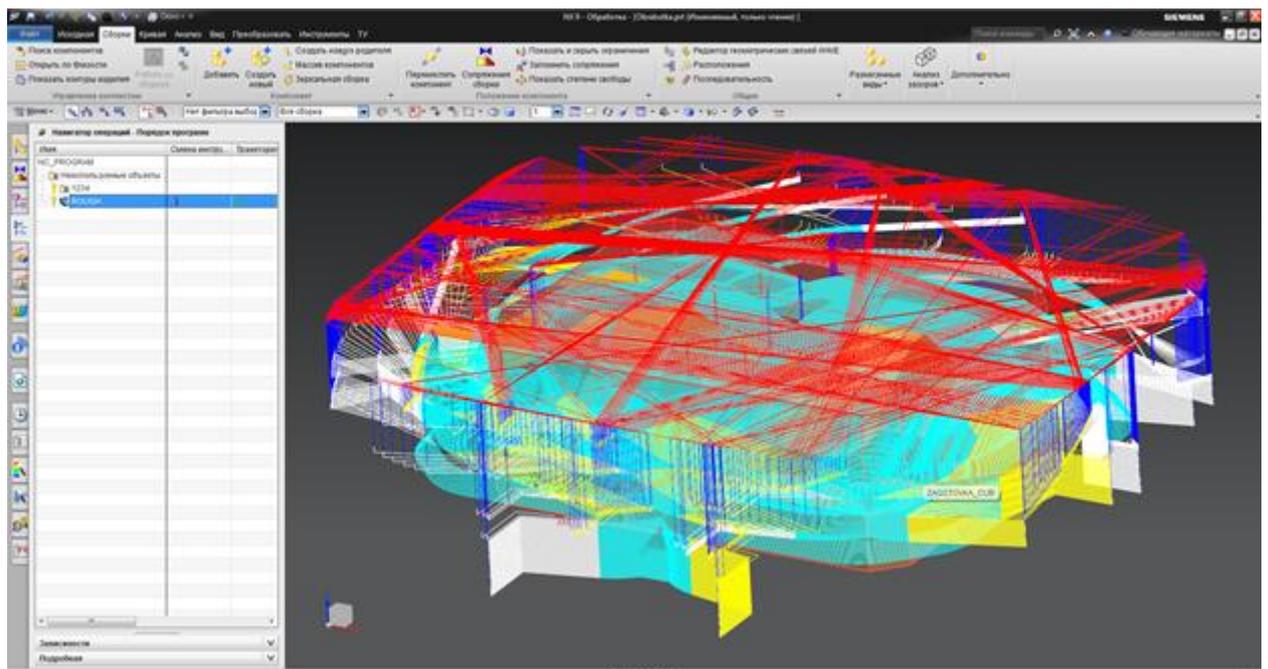
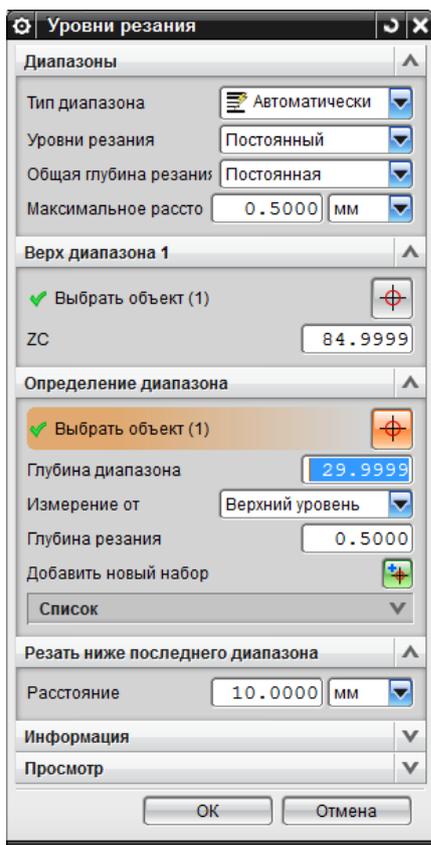


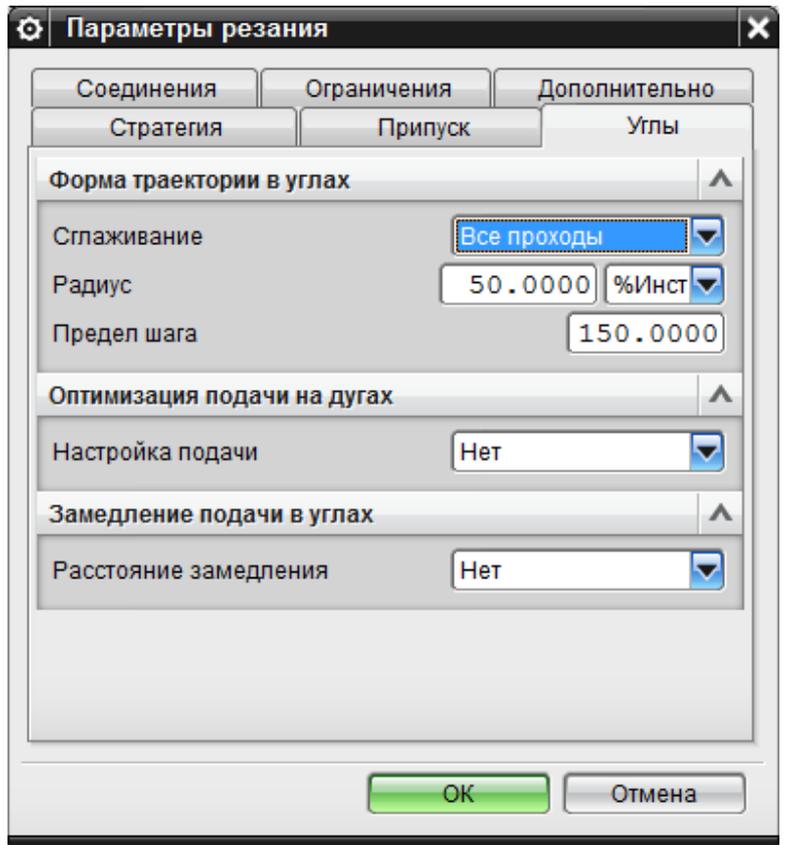
Рисунок 3.4.3 – Вид траекторий черновой обработки (УП1)

Для корректной обработки и снижения машинного времени скорректируем настройки САМ-системы. Зададим в окне «уровни резания» параметр «резать ниже последнего диапазона» и введем значение равное фаске твердосплавных пластин на используемой торцевой фрезе – 10 мм (рисунок 3.4.4а). В окне «параметры резания» установим параметр попутного фрезерования во вкладке стратегия, а во вкладке «углы» установим параметр «сглаживание» на всех проходах (рисунок 3.4.4б).

Верификация «УП1» представлена на рисунке 3.4.5.



а



б

Рисунок 3.4.4 – Корректировка а) уровней резания, б) сглаживания траекторий.

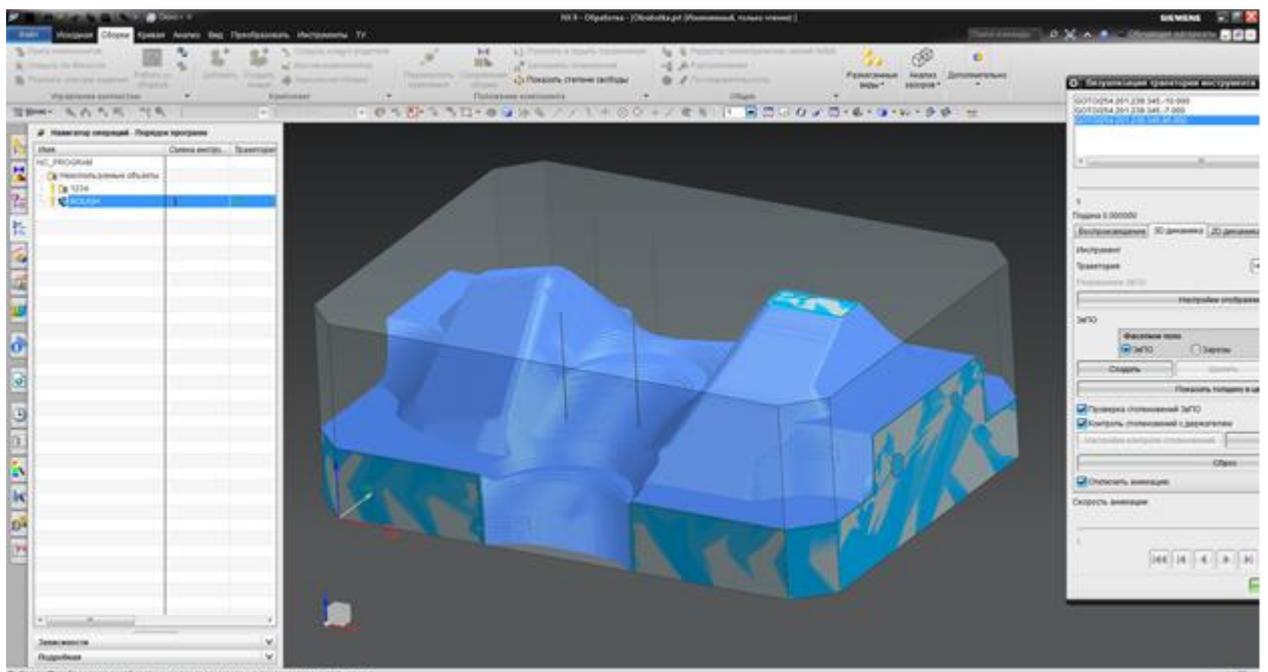


Рисунок 3.4.5- Верификация обработки торцевой фрезой

Для управляющей программы обработки плоских поверхностей также подкорректируем некоторые параметры. В окне параметров резания зададим ограничения подобласти «полы», а так же значение упростить форму «внешний контур» (рисунок 3.4.6). Это позволит САМ-системе не «отвлекаться на точность обработки стенок, прилегающих к обрабатываемым плоским поверхностям, т.к. данные «стенки» являются свободными поверхностями.

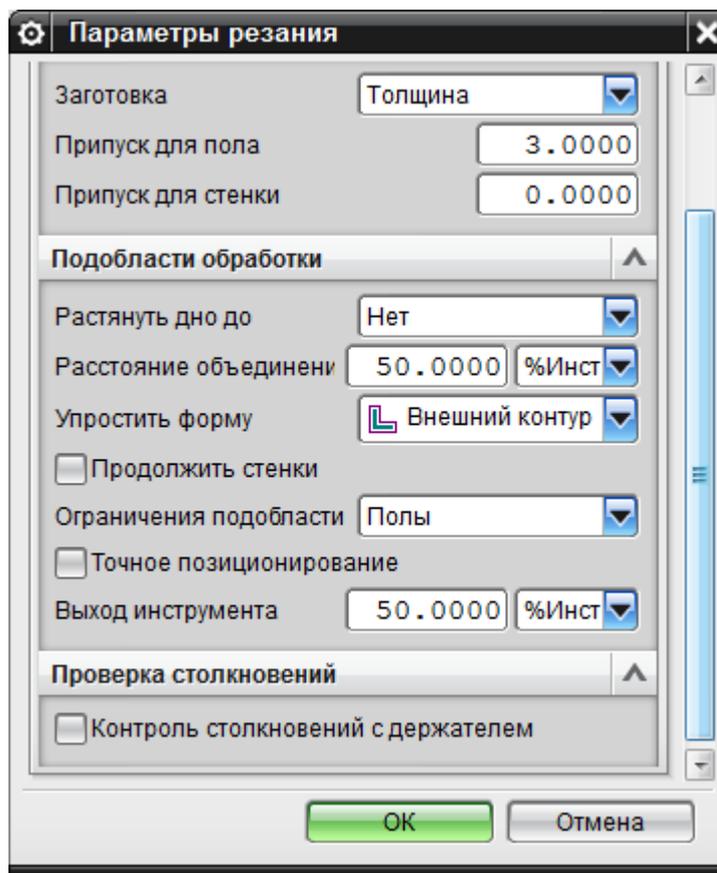


Рисунок 3.4.6 – Корректировка параметров резания для обработки плоских поверхностей.

В окне вспомогательных перемещений укажем тип врезания при обработке открытых областей «линейный» и увеличим длину врезания до 10мм. Это предотвратит бесконтрольное врезание инструмента в еще не обработанные части заготовки (рисунок 3.4.7). Вид траекторий обработки представлен на рисунке 3.4.8.

Произведем общую верификацию «УП1» (рисунок 3.4.9).

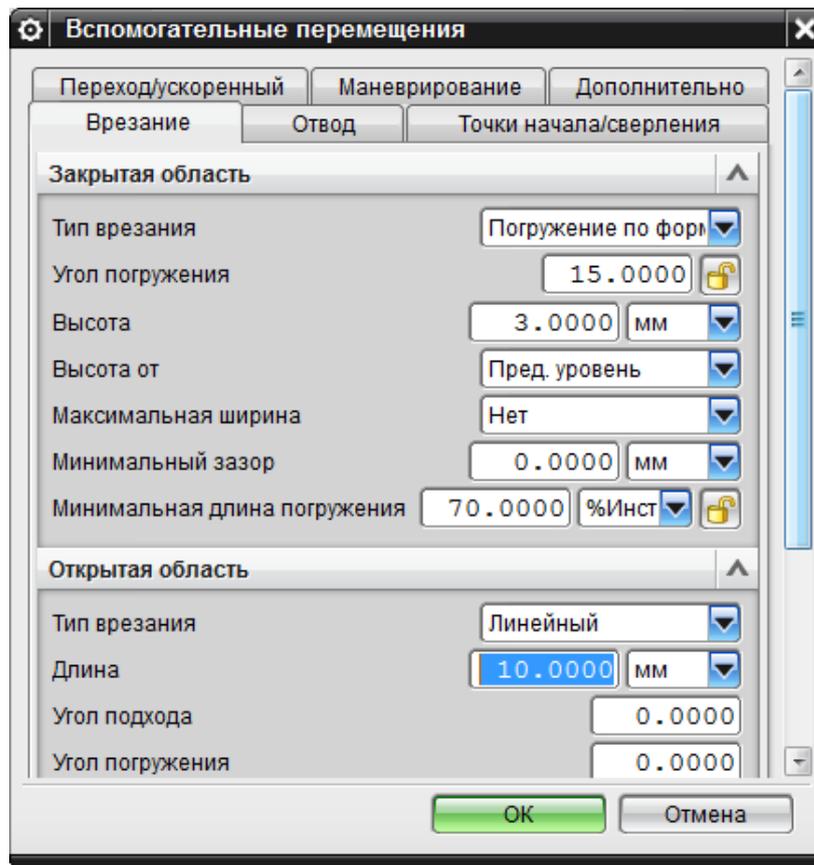


Рисунок 3.4.7 – Корректировка параметров врезания

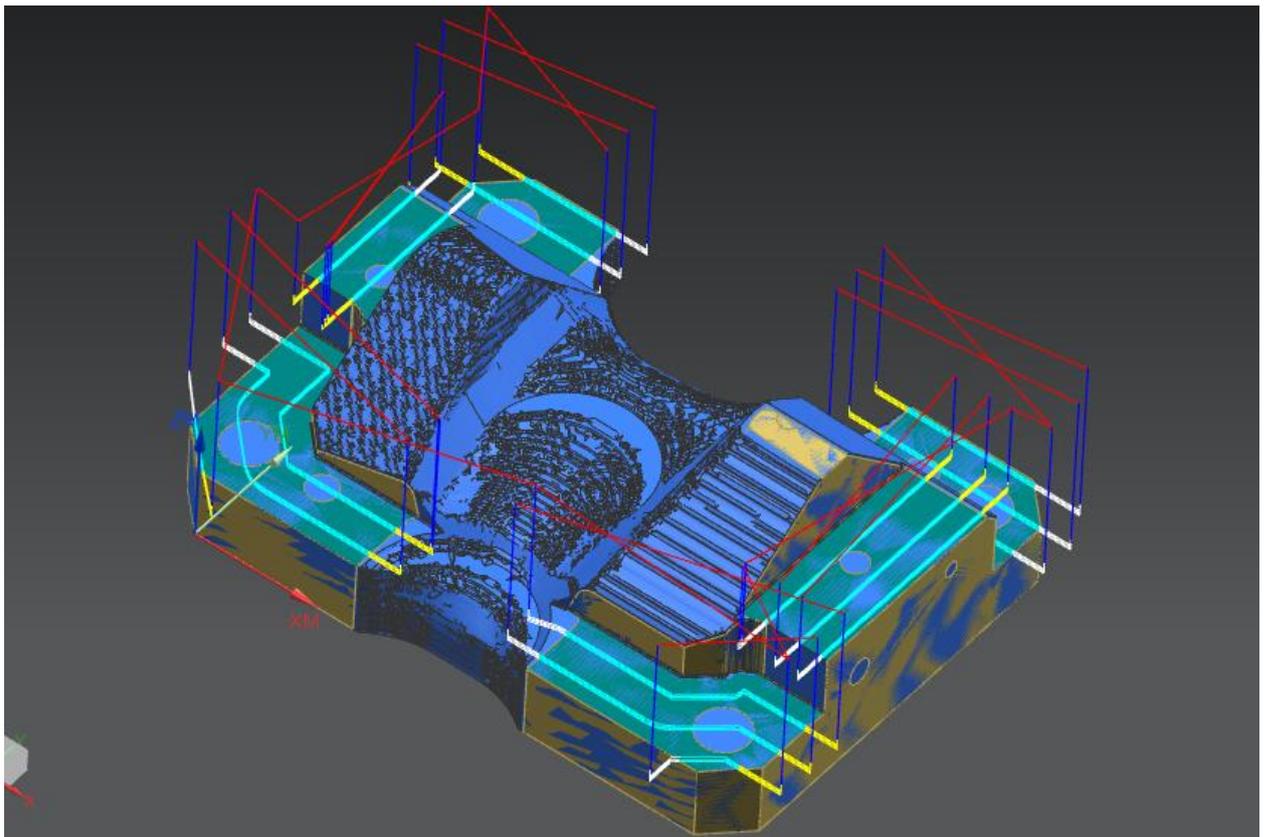


Рисунок 3.4.8 – Вид траекторий обработки плоских поверхностей

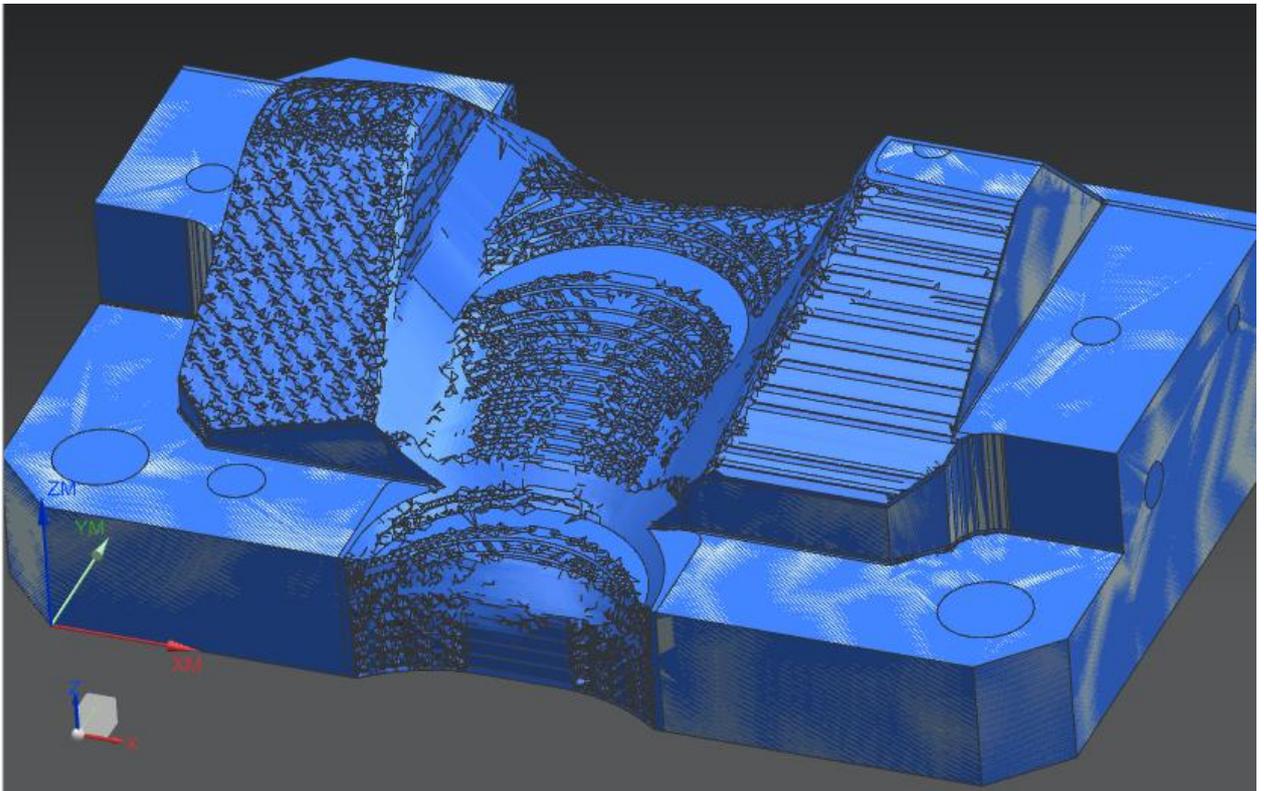
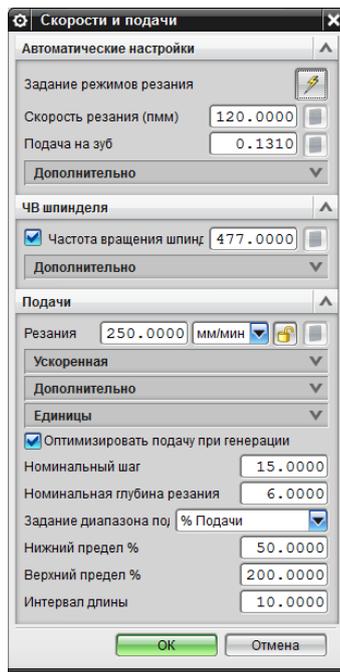
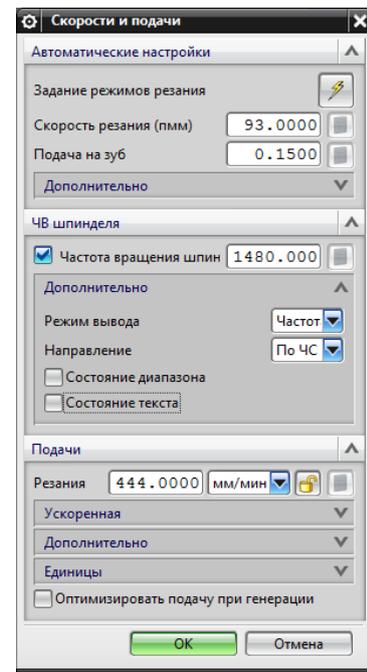


Рисунок 3.4.9 – Общая верификация УП1.



а



б

Рисунок 3.4.10 – Режимы резания для обработки а) сборной торцевой фрезой D60, б) сборной концевой фрезой D20

Неиспользуемые объекты					00:00:00		
1234					00:00:00		
ROUGH		✓	UGT0212_003	1	23:42:57	WORKPIECE	MILL_ROUGH
FINISH-FLAT		✓	UGT0202_010	2	00:26:24	WORKPIECE	MILL_FINISH

Рисунок 3.4.11 – Автоматически рассчитанное время обработки.

В окне режимов резания подставим рекомендуемые значения скорости резания и подачи на зуб (рисунок 3.4.10).

Далее, создадим операцию («УП2») черновой обработки для второго варианта заготовки. Её вид представлен на рисунке 3.4.12. В случае использования такой заготовки, как говорилось ранее, нет необходимости производить обработку плоских участков.

В дереве операций (при включённом «Виде геометрии») создадим новую геометрию, в которой укажем новую модель в качестве заготовки. Это позволит не создавать нового проекта обработки. Создадим черновую операцию обработки фрезой D60 и проведём её верификацию (рисунок 3.4.13). На рисунке 3.4.14 показано время всех созданных операций. Обработка усечённой заготовки потребует около 14 часов 45 минут, что в 1.7 раз меньше времени УП1.

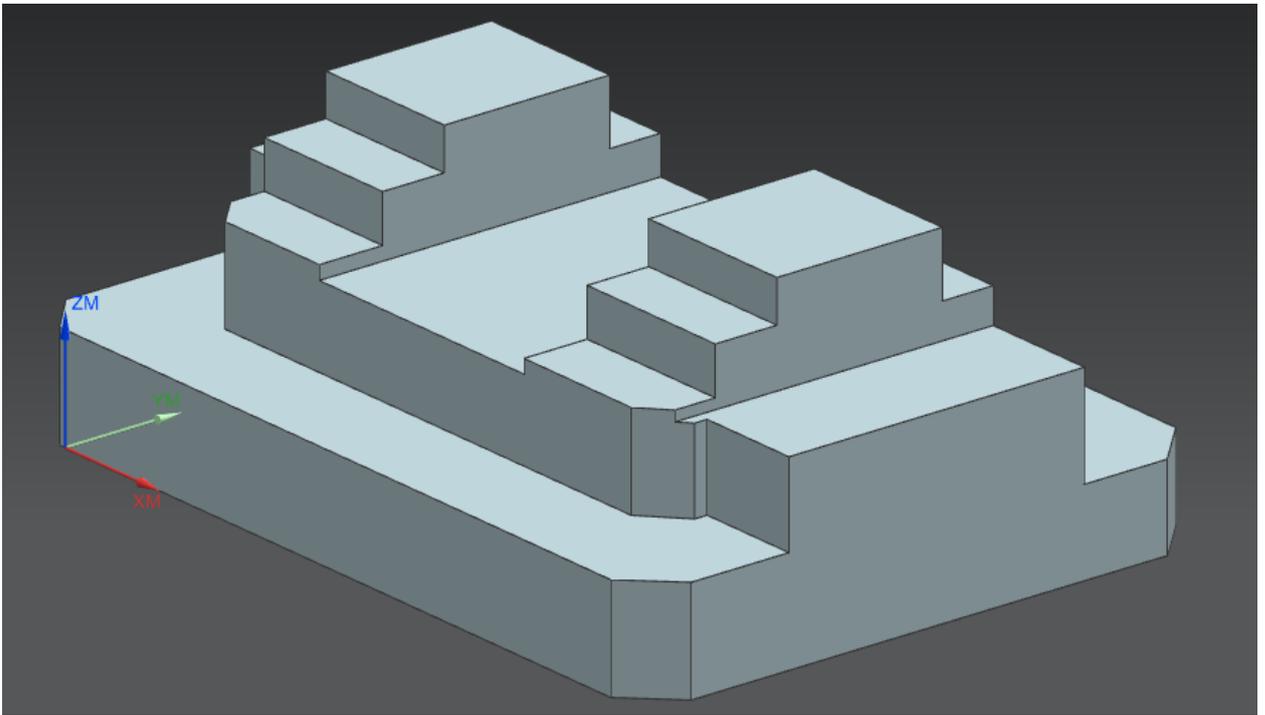


Рисунок 3.4.12 – Вид заготовки с удалённой частью материала на универсальном оборудовании

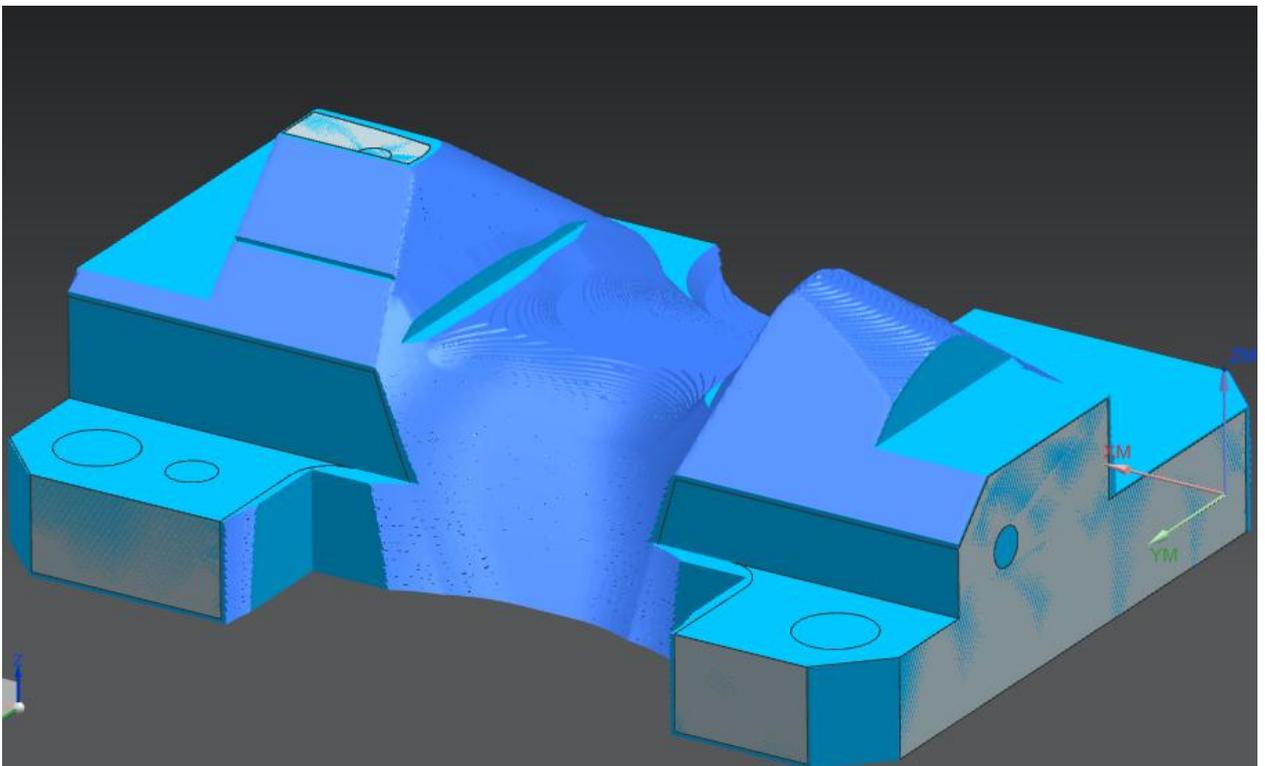


Рисунок 3.4.13 – Верификация УП2

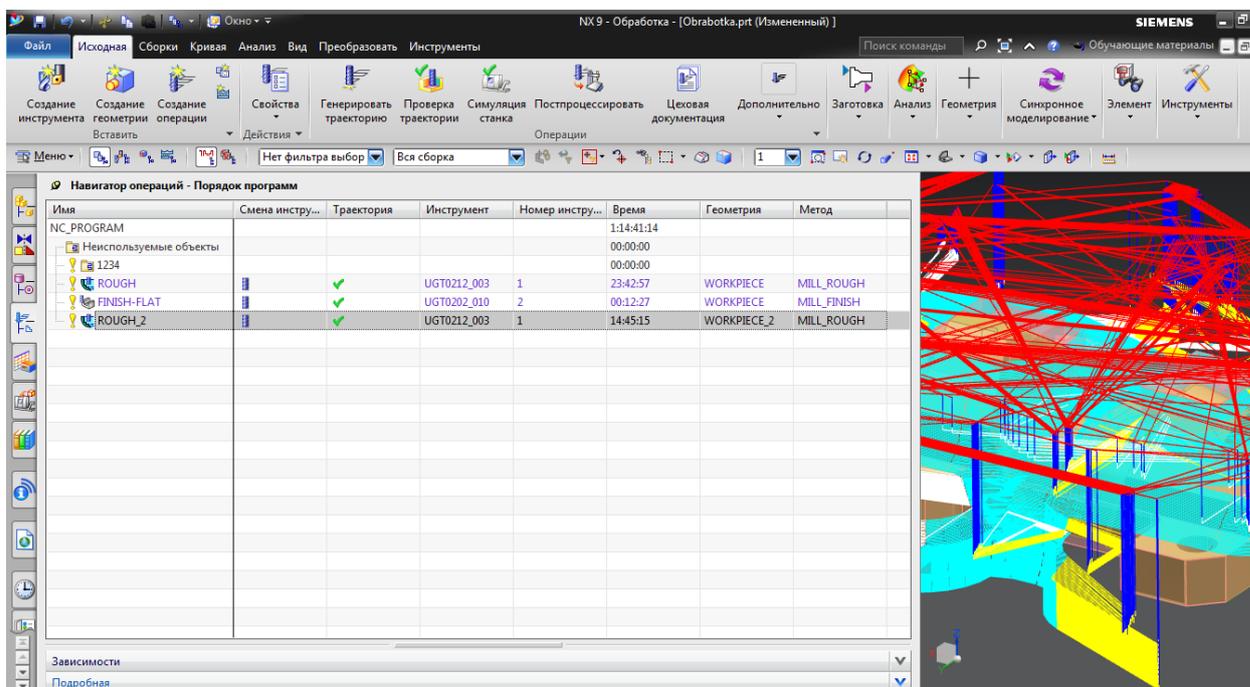


Рисунок 3.4.14 – Время обработки всех созданных операций.

Очевидно, что для третьего перехода черновой обработки создавать управляющую программу нет необходимости, т.к. форма заготовки на этом этапе не играет роли.

Чтобы объективно оценить выгоду от использования предварительно обработанной заготовки, необходимо учесть разницу в стоимости обработки на оборудовании с ЧПУ и универсальном станке. На этапе проектирования технологического процесса достаточно будет учесть разницу в оплате работ станочника-универсала и оператора-наладчика станка с ЧПУ и стоимость использованного инструмента. На предприятии ООО «ДСК-Штамп» в среднем величина оплаты одного часа работы оператора-наладчика станка с ЧПУ выше оплаты станочника-универсала на 20%.

Для расчёта стоимости инструмента, используемого для обработки на станке с ЧПУ, воспользуемся данными из каталога фирмы Rocolm, продукция которой используется на ответственных операциях обработки на предприятии ООО «ДСК-Штамп». Режущие пластины для торцевой сборной фрезы диаметром 60 мм имеют значение стойкости $T = 90$ мин, а пластины для

сборной концевой фрезы диаметром 20мм – 60 мин. Таким образом для УП1 потребуется 16 пластин для торцевой фрезы и 4 пластины для концевой. Для УП2 потребуется 10 пластин для торцевой фрезы. Средняя стоимость подобных пластин производства Pokolm 400 рублей/шт. Очевидно, что стоимость инструмента для наиболее короткой по времени черновой обработки (УП2) 4000р.

Для инструмента, применяемого на универсальном станке ситуация несколько иная. Используемые здесь фрезы имеют высокий срок службы в виду возможности их повторной заточки. Для расчёта примем цилиндрическую фрезу диаметром 40мм оснащённую пластинами из сплава T15K20. Ресурс таких фрез, в основном определяется опытным путём. Однако для расчёта допустимо воспользоваться справочной литературой и принять время стойкости фрезы за $T=120$ мин. Рыночная стоимость таких фрез в среднем около 1200руб/шт. В соответствии табличным значениям режимов резания для данного инструмента рассчитаем время обработки заготовки на универсальном станке:

$$T_m = \frac{L \cdot n}{F \cdot 60}, \quad (9)$$

где

T_m – машинное время,

L – общая длина обработки,

n – количество проходов,

F – подача мм/мин.

Подставим числовые значения, снятые с параметров модели заготовки:

$$T_m = \frac{1395 \cdot 60}{400 \cdot 60} = 3.5 \text{ ч.}$$

Полученное значение соответствует 1.75 периодам стойкости инструмента, что обязывает увеличить стоимость обработки на значение стоимости переточки фрезы. Для расчёта стоимости обработки допустимо

принять этот параметр за 10% от стоимости инструмента, что составит 120руб.

Рассчитаем общую себестоимость обработки обоих вариантов. Для УП1:

$$S = s_{\text{инстр.}} + t_{\text{обр.}} \cdot K,$$

где

S – стоимость обработки,

$s_{\text{инстр.}}$ – стоимость инструмента,

$t_{\text{обр.}}$ – время отработки управляющей программы,

K – стоимость часа работы рабочего.

Подставим полученные числовые значения:

$$S_{\text{УП1}} = 8000 + 24 \cdot K_{\text{ЧПУ}},$$

$$S_{\text{УП2}} = 4000 + 1320 + 15 \cdot K_{\text{ЧПУ}} + 3,5 \cdot K_{\text{ун.}}$$

Выразим $K_{\text{ун.}}$ – стоимость часа работы станочника-универсала через $K_{\text{ЧПУ}}$. В целях получения отношения стоимостей примем величину оплаты $K_{\text{ЧПУ}}$ за 10руб/час:

$$K_{\text{ун.}} = 0,8K_{\text{ЧПУ}}, \quad (10)$$

$$\frac{S_{\text{УП1}}}{S_{\text{УП2}}} = \frac{8240}{5498} = 1,5.$$

Таким образом вариант с предварительно обработанной заготовкой дешевле обработки из «кубика» в 1.5 раза.

По данным полученным из анализа моделей заготовок следует, что объём обработанной заготовки на универсальном станке меньше кубической в 1,8 раз. Таким образом, можно утверждать, что при снижении объёма заготовки на универсальной операции на каждые 10%, общая себестоимость механической обработки снижается приблизительно на 14%. Т.е. достижение заданной целевой функции возможно при использовании универсального оборудования на заготовительных этапах обработки.

3.5 Выводы

В данной главе был проведён анализ выбранной типовой детали, описаны её технологические особенности. Был разработан алгоритм выбора оптимальной заготовки для производства цельных формообразующих частей штамповой оснастки в виде блок-схемы. С помощью моделирования механической обработки в САМ-системе Siemens NX9 было приведено обоснование применения универсального оборудования для предварительной обработки заготовок для деталей, имеющих сложные поверхности.

Глава 4. Усовершенствование управляющей программы для оборудования с ЧПУ

Как указывалось ранее, минимальная протяжённость траекторий при механической обработке является одним из критериев целевой функции параметрической оптимизации. В случае оптимизации управляющих программ, можно иметь дело лишь с решениями и подходами, реализованными в конкретной САМ-системе. В первой главе данного исследования описаны наиболее передовые САМ-системы. Именно из их списка была выбрана САПР Siemens NX9, для генерирования оптимальных УП и применения наиболее продуктивных решений.

Основную массу времени при обработке сложных деталей на станках с ЧПУ занимают чистовые операции. Помимо того, что на финишных операциях часто требуется занижение режимов резания с целью получения необходимого качества поверхности, обычно не станочнику не обойтись без, как минимум, ещё одной отработки управляющей программы. Причиной этому «отгибание» режущего инструмента в процессе обработки. Обычно это происходит в участках детали, где осевые силы резания увеличиваются ввиду формы поверхности близкой к вертикальной. Ухудшает положение большая разница высот обрабатываемых поверхностей, которая требует большого вылета инструмента из шпинделя, что негативно сказывается и на его обрабатывающей способности, и на качестве обработанных поверхностей. Все перечисленные сложности указывают на острую необходимость оптимизации, используемых на чистовых операциях, управляющих программ.

Автоматизация создания управляющих программ для сложных деталей сегодня затруднена ввиду сложности математического определения оптимальных стратегий обработки. Однако, определённые сложившиеся подходы к подобной обработке существуют и позволяют существенно снизить время фрезерования на оборудовании с ЧПУ.

Чаще всего оптимизации подвергаются следующие части управляющих программ:

1. «холостые» переходы – перемещения инструмента без снятия материала, объём которых необходимо минимизировать;
2. количество врезаний инструмента в заготовку – большое количество врезаний отрицательно сказывается на режущем инструменте, так как в этот момент происходит резкое возрастание сил резания, а так же увеличивает время обработки;
3. резкие переломы в траекториях обработки – так же негативно сказывается как на инструменте, так и на качестве обрабатываемой поверхности.

Разработаем и оптимизируем управляющую программу для чистовой обработки типовой детали типа пуансон.

4.1 Разработка и усовершенствование управляющей программы чистовой обработки.

Анализ модели детали показал, что наименьший радиус у основания выпуклых поверхностей равен 4мм. Создадим в проекте обработки системы Siemens NX соответствующий инструмент – радиусную фрезу диаметром 8 мм и радиусом скругления режущих кромок 4 мм (рисунок 4.1.1). Из библиотеки вызовем подходящий под условия обработки держатель.

Создадим операцию глубинного фрезерования (CAVITY_MILL) и зададим в качестве обрабатываемых поверхностей области не обработанные на предыдущих операциях. Подкорректируем уровни резания, указав программе, что производить обработку необходимо ниже последнего уровня на величину радиуса инструмента. Для экономии времени расчета траекторий укажем заведомо завышенное значение шага фрезерования – 6 мм. Далее ничего не изменяя запустим генерацию траекторий (рисунок 4.1.2).

Как видно из рисунков 4.1.2 и 4.1.3 в траекториях созданных автоматически присутствует большое количество врезаний инструмента, свободных от обработки перемещений, а так же излишнее дробление траекторий на мелкие участки.

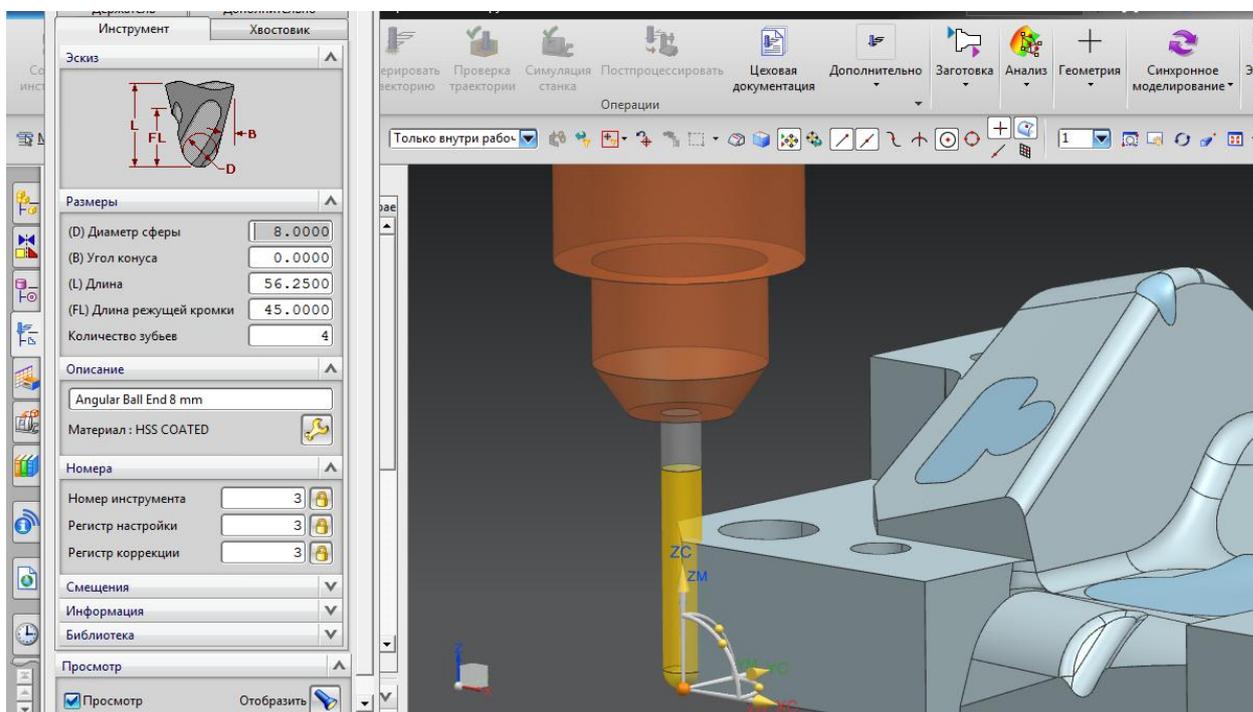


Рисунок 4.1.1 – Процесс создания радиусной фрезы D8R4

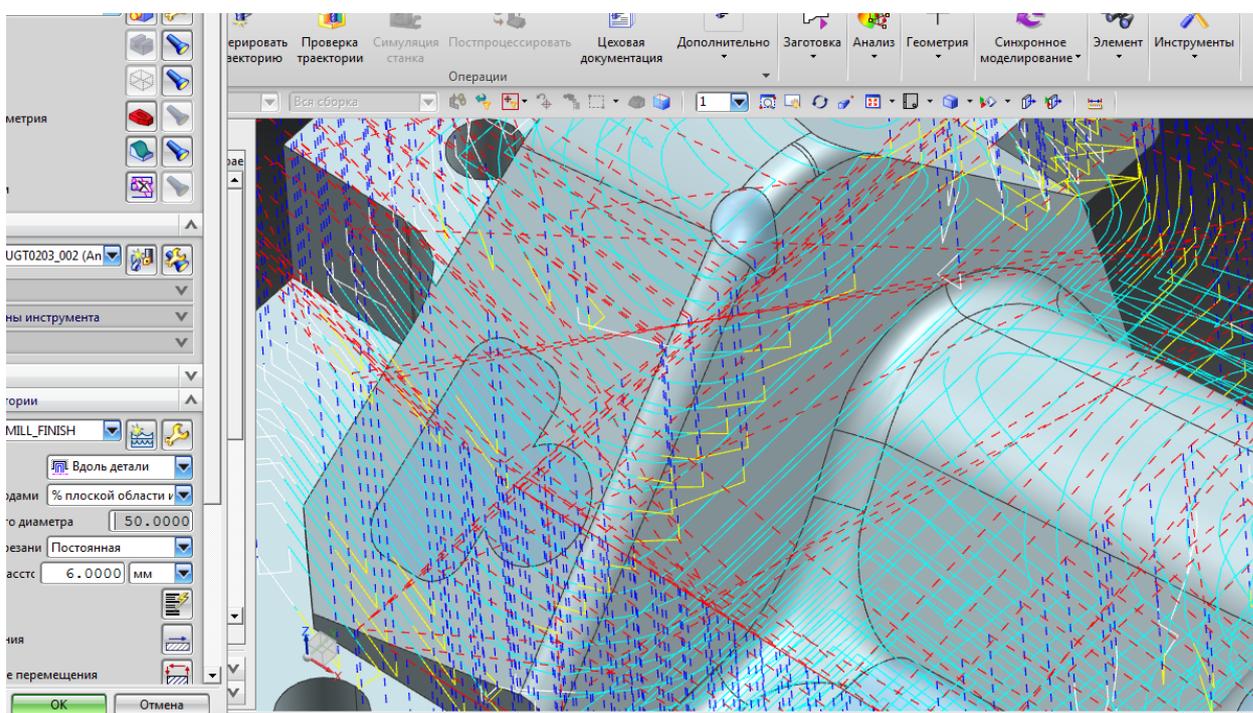


Рисунок 4.1.2 – Автоматически сгенерированная управляющая программа

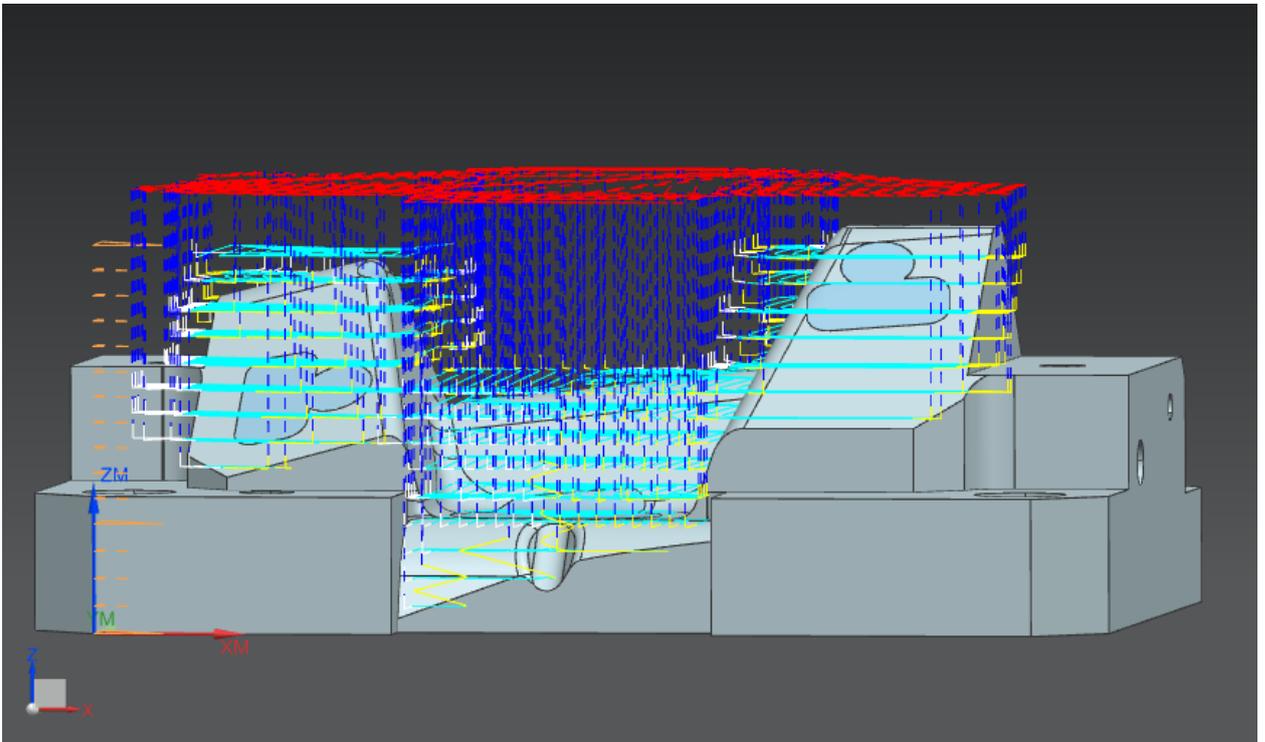


Рисунок 4.1.3 – Большое количество свободных перемещений

Для того, что бы в процессе создания управляющей программы видеть изменение времени обработки, зададим режимы резания. Их соответствие рекомендуемым значениям на данном этапе не играет роли (рисунок 4.1.4).

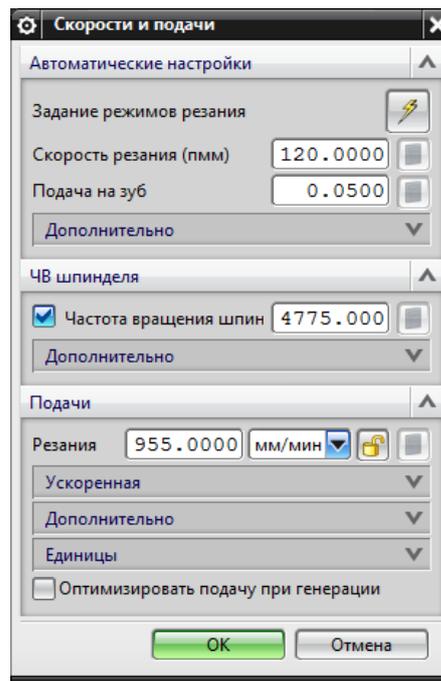
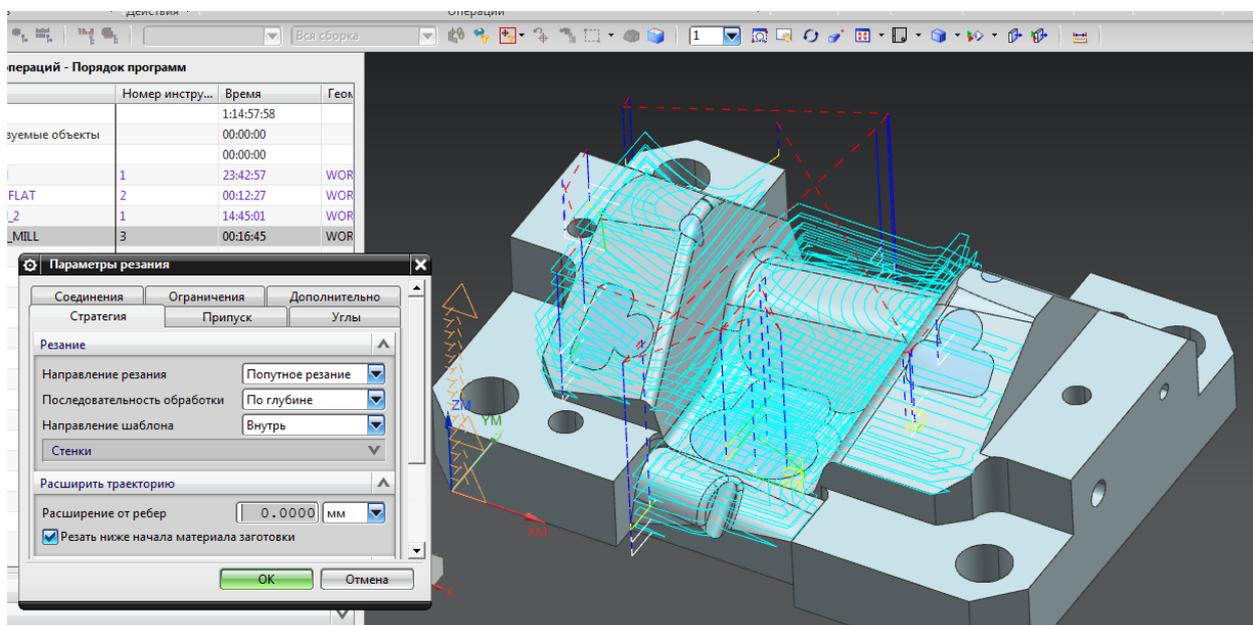


Рисунок 4.1.4 – Окно режимов резания

Далее, в параметрах обработки укажем последовательность обработки «по глубине» и направление шаблона «внутри». На рисунке 4.1.5 видно, что количество переходов и врезаний заметно снизилось, что уменьшило время обработки на 1.5 мин.



4.1.5 – Корректировка параметров резания

В окне вспомогательных перемещений зададим тип врезания по дуге. Это несколько увеличит время обработки, однако предотвратит деталь от зарезов при врезании в «стенку» (рисунок 4.1.6).

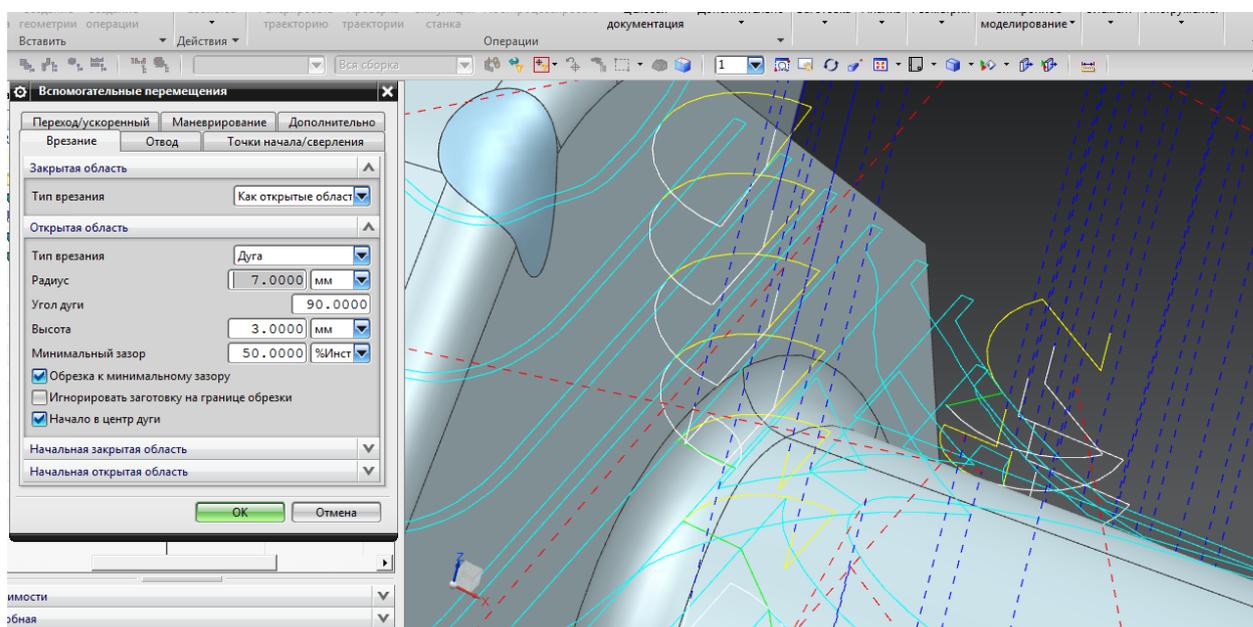


Рисунок 4.1.6 – Дуговое врезание инструмента

Далее, изменим параметр «зазор» в окне вспомогательных перемещений на автоматическую плоскость и зададим параметр «расстояние безопасного зазора» 1 мм. Это позволит снизить длину «холостых» перемещений (рисунок 4.1.7).

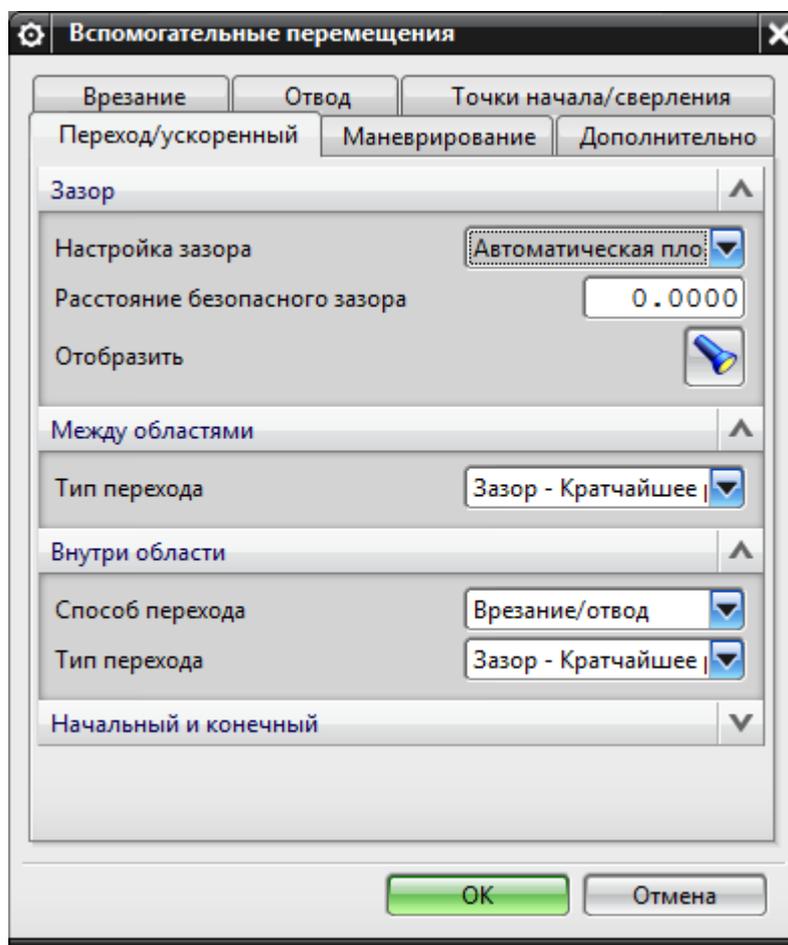


Рисунок 4.1.7 – Изменение зазоров обработки

Для фрезерования подобных поверхностей предпочтительно, что бы инструмент находился в контакте с заготовкой как можно дольше. Попытаемся снизить количество врезаний с помощью смены стратегии обработка на «профиль» (рисунок 4.1.8)

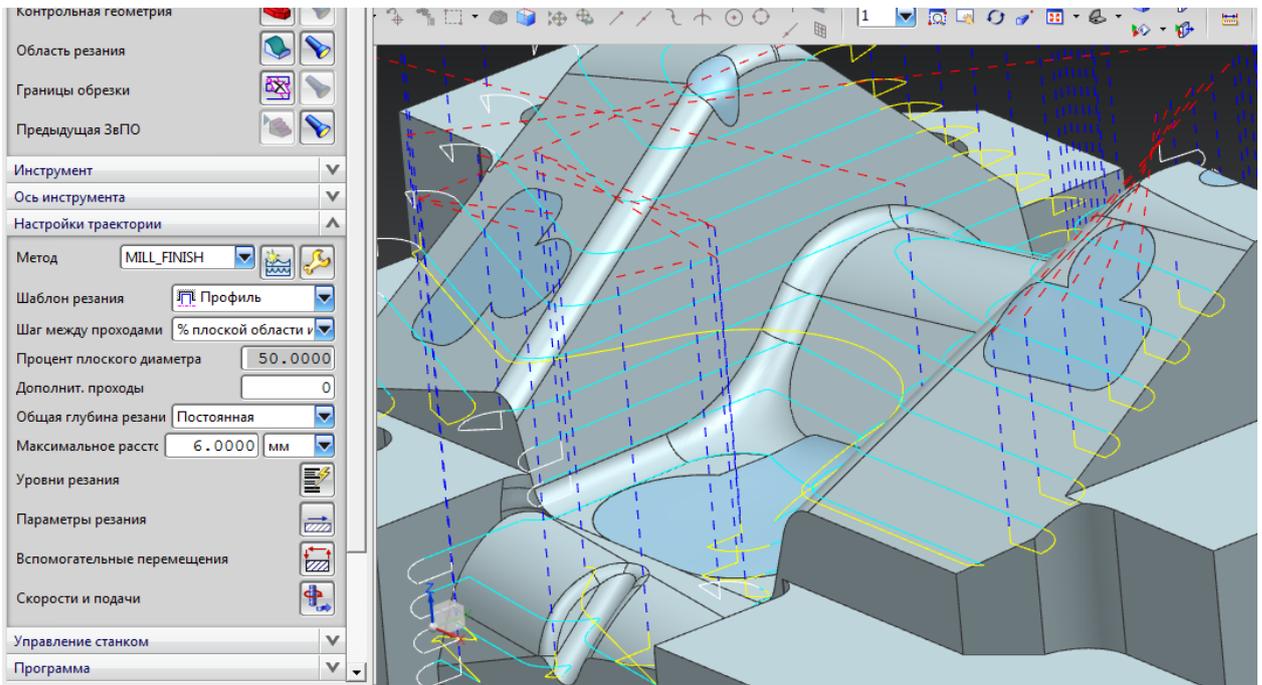


Рисунок 4.1.8 – Применение шаблона резания «профиль»

Кроме того, данный шаблон резания снизил время обработки с 10 минут до 5:13.

Однако, проанализировав полученные траектории приходим к выводу, что обработка малых радиусов у основания выпуклых поверхностей таким методом опасна зарезами, т.к. инструмент будет испытывать повышенные нагрузки при прохождении радиусного участка малого значения. Т.к. для разворота у инструмента практически не остаётся места, ввиду резкого перелома траектории, могут возникнуть вибрации, которые повлекут зарезы на детали. Для предотвращения зарезов применим сглаживание траекторий в углах (рисунок 4.1.9). Заново сгенерируем операцию, результат на рисунке 4.1.10.

Как видно из последнего рисунка, в траекториях отсутствуют резкие переломы. Однако в дальнейшем, потребуется доработка радиусных участков.

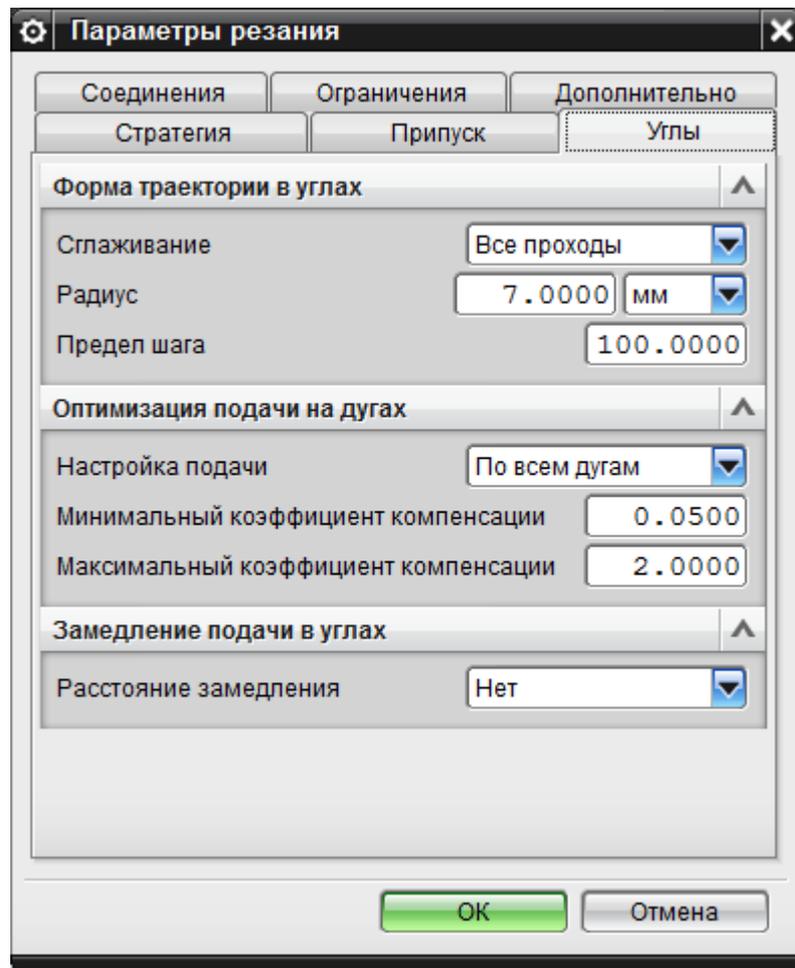


Рисунок 4.1.9 – Применение сглаживания в углах траекторий

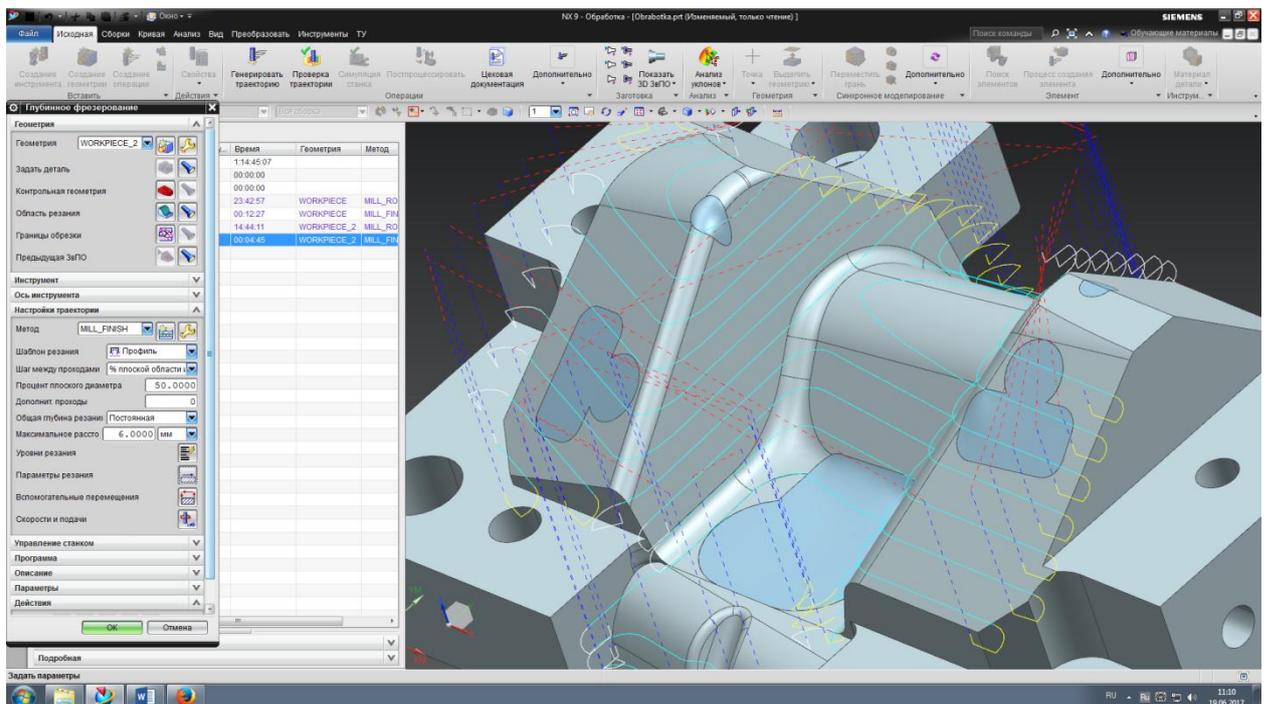


Рисунок 4.1.10 – Результат сглаживания траекторий в углах

В результате изменения настроек управляющей программы время обработки достигло значения 4 мин. 45 сек. Изменим глубину резания на рекомендуемую и проведем верификацию программы. Вид траекторий представлен на рисунке 4.1.11, результат верификации на рисунке 4.1.12.

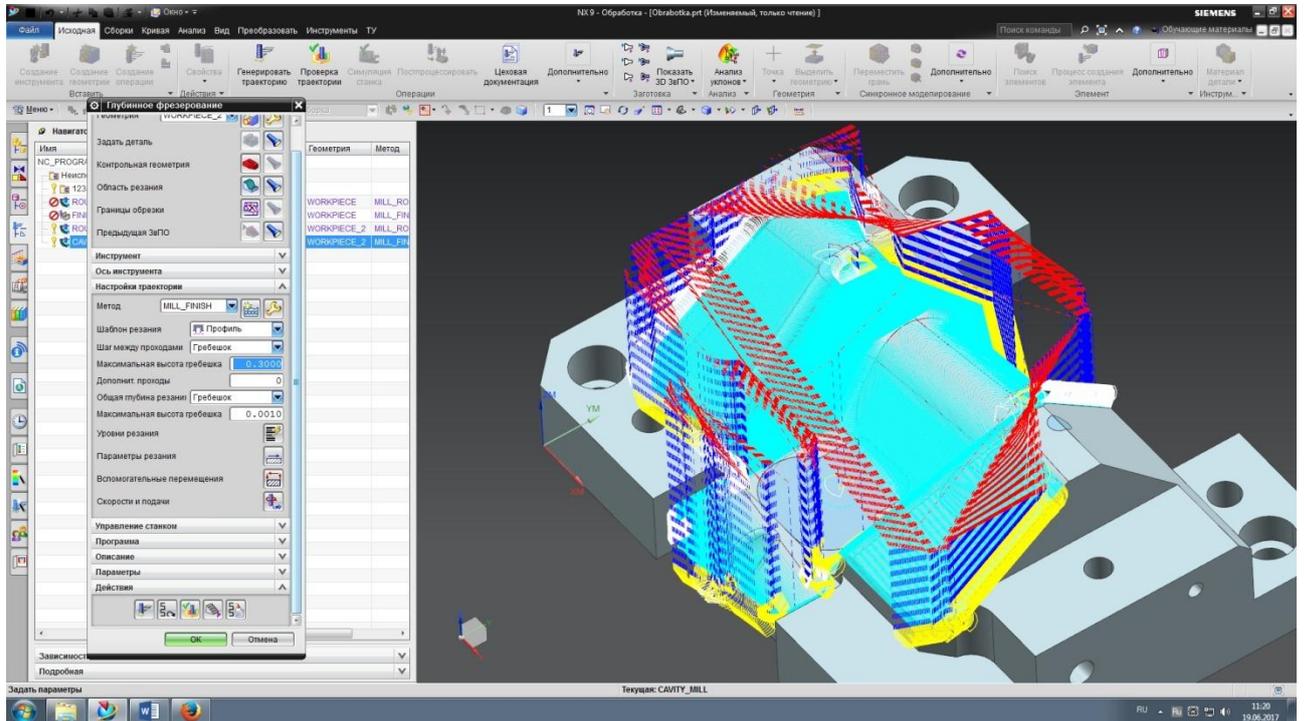


Рисунок 4.1.11 – Вид чистой управляющей программы

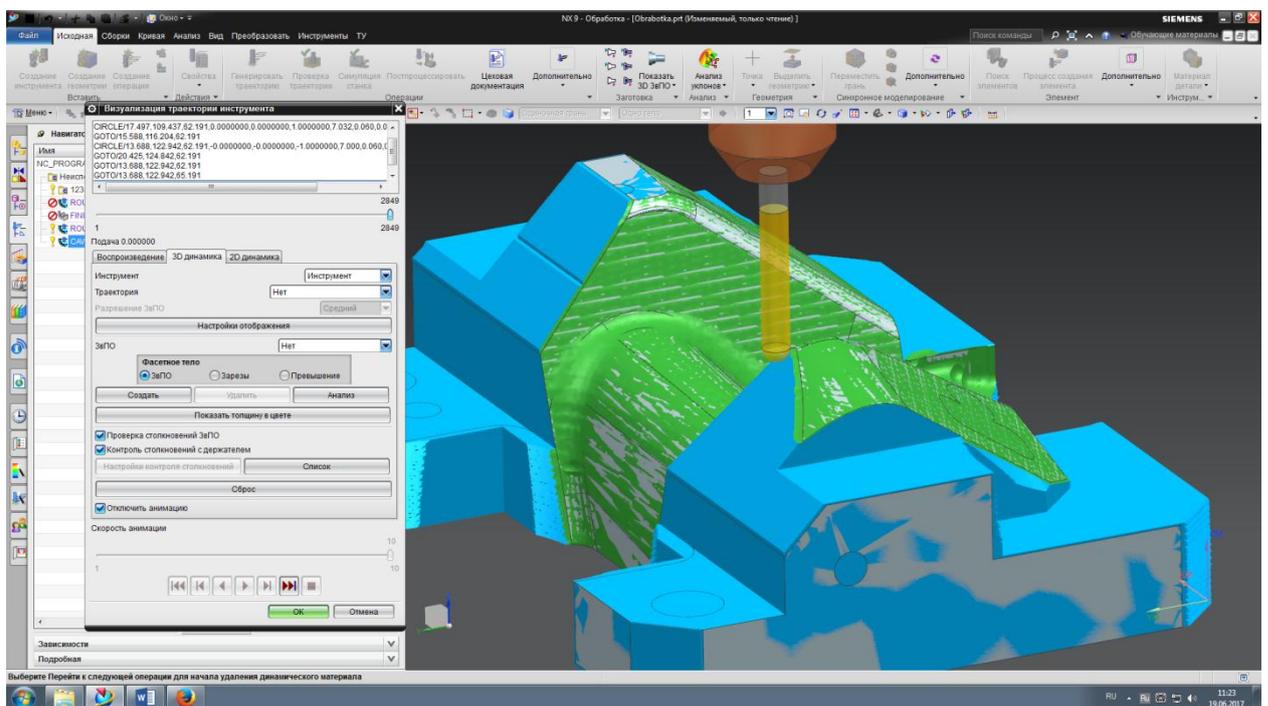


Рисунок 4.1.12 – Верификация чистой управляющей программы

Как видно из последнего рисунка, радиусные участки остались не обработанными. Применим специальный подтип операций «доработка углов на основе ссылочного инструмента» (рисунок 4.1.13).

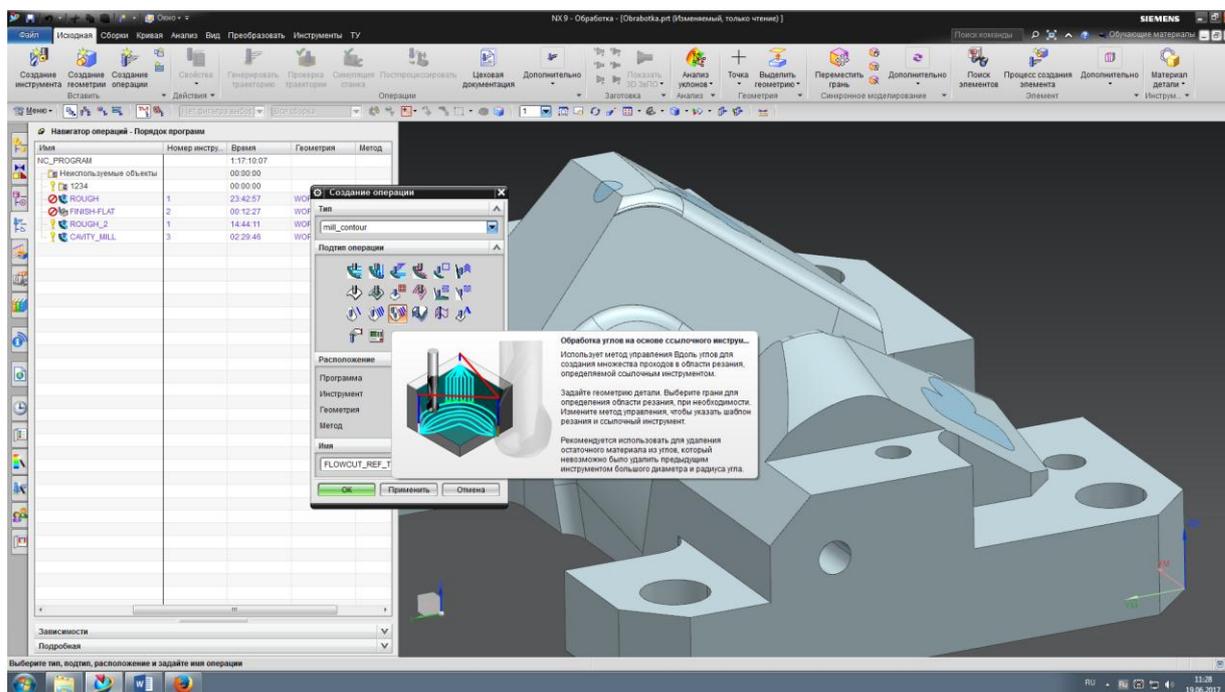


Рисунок 4.1.13 - подтип операций «доработка углов на основе ссылочного инструмента»

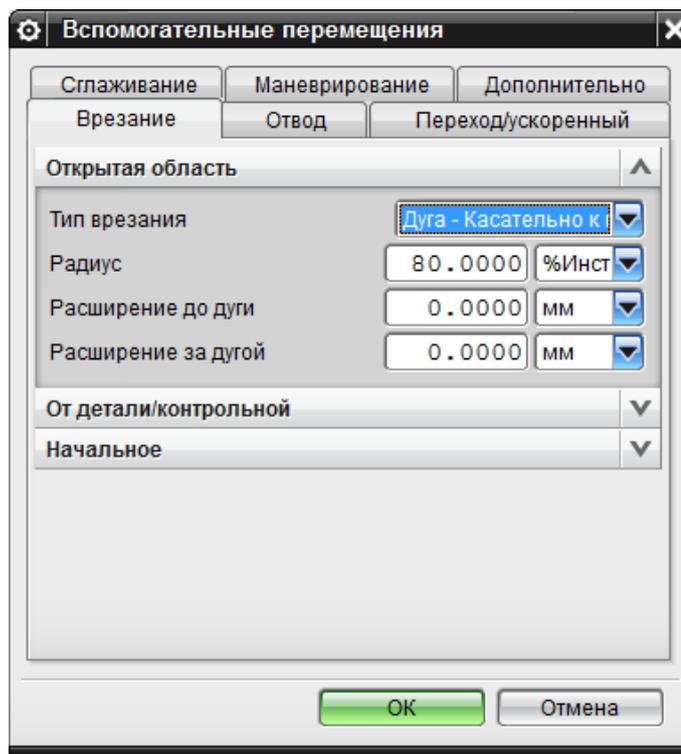


Рисунок 4.1.14 – Изменение параметров врезания

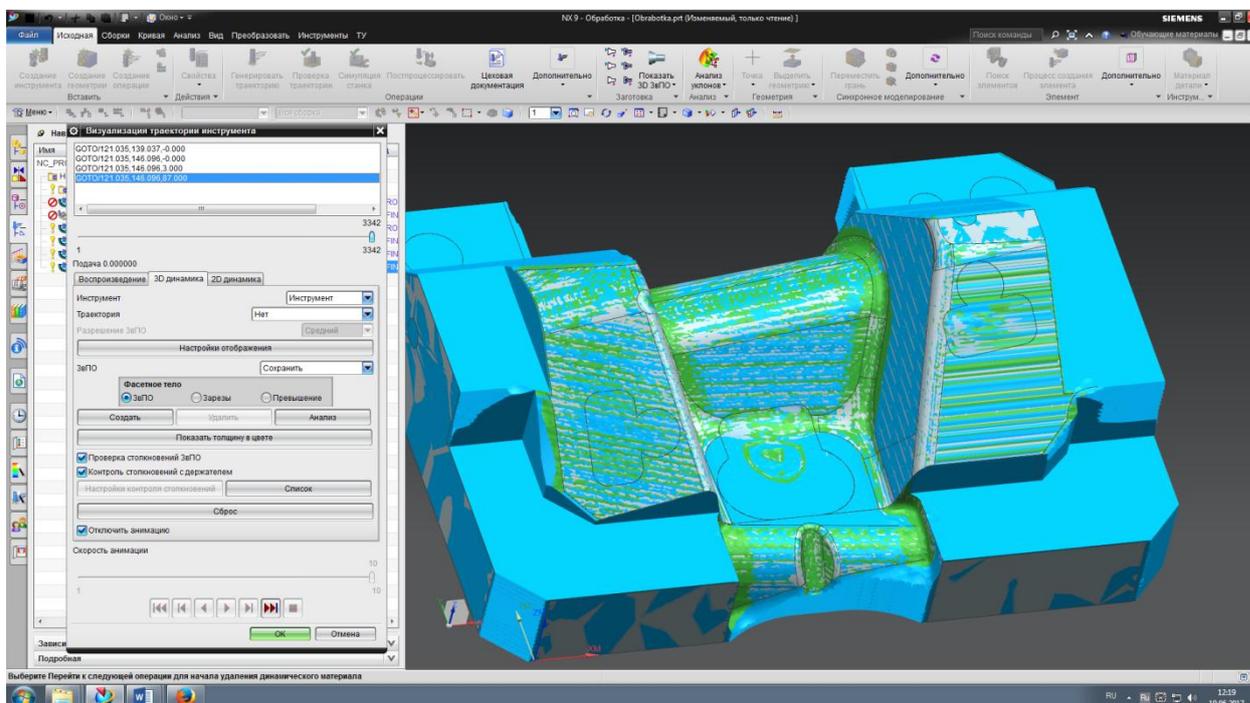


Рисунок 4.1.15 – Визуализация доработки радиусных участков

В качестве ссылочного инструмента укажем эту же фрезу D8R4. В параметрах резания зададим попутное фрезерование. В окне вспомогательные перемещения изменим тип врезания на «дуга – касательно к подходу» для того, что бы окончательно определить направление врезания инструмента, т.к. для радиусных участков это играет большую роль (рисунок 4.1.14).

Итог визуализации обработки представлен на рисунке 4.1.14. Общее время обработки 4 часа 22 минуты. Средствами оптимизации траекторий и использования соответствующих методов машинное время было снижено не менее чем в 1,4 раза, по сравнению с используемыми управляющими программами на ООО «ДСК-Штамп».

4.2 Выводы

По итогам проведенного моделирования обработки в системе Siemens NX9 можно сделать следующие выводы:

1. Шаблоны резания играют одну из самых важных ролей в скорости обработки. Так смена шаблона «вдоль детали» на «профиль» позволила уменьшить время обработки почти в два раза.
2. Основную сложность в исследуемой группе деталей при обработке представляют участки с малыми радиусами, т.к. САМ-система не позволяет увидеть на этапе проектирования управляющей программы опасность зарезов из-за чрезмерных нагрузок на инструмент.
3. Наиболее рационально не обрабатывать участки с малыми радиусами в одной управляющей программе с остальными поверхностями, а обойти их, либо сгладить траектории, оставив доработку специальным группам стратегий.
4. Часто не рационально задавать врезания по дуге в открытых областях, так как это не приносит практической пользы, а напротив, увеличивает время обработки, объём управляющей программы и нагрузку на вычислительные мощности станка с ЧПУ.

Глава 5. Параметрическая оптимизация процессов механической обработки

5.1 Определение целевой функции

В основе всякой оптимизации лежит правильно определённая целевая функция либо их множеств. Основой критериев в целевой функции являются максимальная производительность и минимальная себестоимость. Однако стоит отметить, что выбор, к примеру, оптимальных режимов обработки детали на металлорежущих станках не совпадает с критерием минимальной себестоимости. Фактически, приходится выбирать между высокой скоростью обработки и низкой себестоимостью детали, при заданных параметрах готовой детали. В этом случае приходится решать задачу многокритериальной оптимизации.

Наиболее распространённым подходом в решении многокритериальной задачи является построение компромиссной целевой функции. Построим целевую функцию, включающую в себя, как говорилось ранее, максимальную производительность и минимальную себестоимость.

Штучная производительность на операции механической обработки определяется величиной штучного времени и выражается как

$$T_{шт} = T_o + T_v + T_{обс.} + T_{о.л.н.}, \quad (11)$$

где

T_o – основное время на операцию;

T_v – вспомогательное время, включающее установку и снятие детали на станке, его наладку и т.д.;

$T_{обс.}$ и $T_{о.л.н.}$ – время на обслуживание рабочего места и время на отдых и личные потребности рабочего.

Помимо основного времени, все параметры штучного времени постоянны и зависят лишь от квалификации рабочего и структуры

производства. Основное время, с точки зрения обработки на оборудовании с ЧПУ, можно выразить как

$$T_0 = \Sigma T_{0j}, \quad (12)$$

где

T_{0j} – время на j -тую операцию из переходов T_0 .

Такой критерий оптимальности как «максимальная производительность», в конечном итоге, определяется временем обработки, что позволяет преобразовать его в критерий «минимальное штучное время» (в пределах одной операции). В конечном итоге, критерий рассматривается в качестве той части штучного времени, которая зависит от режимов резания.

Критерий минимальной себестоимости включает в себя обширный список составляющих, как: трудоёмкость, стоимость обработки детали на станке с учётом амортизации, затраты на помещение, энергию и др., затраты на инструмент и т.д. Все эти параметры можно разделить на постоянные, т.е. не способные к варьированию, и переменные. Переменными будут являться те параметры, которые зависят от режимов резания. Величина себестоимости, зависящая от режимов резания, и используемая в дальнейшем, может быть выражена в виде:

$$E = E_{об.} \cdot T_{шт.}, \quad (13)$$

где $E_{об.}$ – стоимость работы оборудования руб./час.

Как было описано выше, частью штучного времени, зависящей от режимов резания, является машинное время. Необходимо представить чёткую связь машинного времени с режимами резания, для получения полной математической модели. Выразим машинное время обработки на станке с ЧПУ следующим образом:

$$T_{0j} = \frac{L_{упj}}{F_j}, \quad (14)$$

где

$L_{упj}$ – общая длина траекторий j -й управляющей программы (мм),

F_j – минутная подача в j -й управляющей программе (мм/мин).

Длину траекторий $L_{УПj}$ можно представить как

$$L_{УПj} = l_{р.х.} + l_{врез.} + l_{св.х.} + \dots, \quad (15)$$

Где

$l_{р.х.}$ – длина рабочего хода в УП,

$l_{врез.}$ – длинна траекторий врезания,

$l_{св.х.}$ – суммарная длина свободных переходов.

Для того что бы учесть разницу подач рабочего хода, врезания и свободных переходов перепишем выражение (13) в виде

$$T_{oj} = \frac{L_{р.х.j}}{F_{р.х.j}} + \frac{L_{врез.j}}{F_{врез.j}} + \frac{L_{св.х.j}}{F_{св.х.j}} + \dots. \quad (16)$$

Величина подач на холостых проходах будет постоянна, в отличие от подачи рабочего хода и врезания. Подача при врезании обычно принимается за 50% от рабочей. Величина подачи при обработке в дальнейшем будет приниматься исходя из рекомендаций фирмы производителя того или иного инструмента. Стоит заметить, что стоимость фрез и пластин для сборного инструмента пропорциональна рекомендуемым подачам на обработку. Это вносит ещё один критерий, поддающийся оптимизации – стоимость инструмента.

Для описания процессов резания используются математические модели в виде степенных, показательно-степенных и полиномиальных уравнений. Основным параметром инструмента, влияющим на скорость обработки, помимо подачи, является скорость резания. Максимальные значения скорости резания так же будут приняты из рекомендаций производителя. Однако, данная величина требует корректировки в зависимости от некоторых условий. Данные зависимости выражаются следующим образом:

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S_z^y B u Z^p} K_v. \quad (17)$$

Формула 4.1.1 отображает зависимость скорости резания от подачи на зуб, характеристик материала и оборудования, характеристик самого

инструмента и др. Все эти параметры будут подробно рассмотрены в дальнейшем.

Ввиду изложенного, можно определить целевую функцию параметрической оптимизации как достижение минимальной себестоимости процесса обработки:

$$F E \rightarrow \min. \quad (18)$$

5.2 Создание математической модели процесса обработки

Как уже упоминалось, при математическом описании процессов обработки, выделяют входные (неуправляемые) и выходные (искомые) параметры, связанные между собой функциональными зависимостями. Именно совокупность этих зависимостей и представляет собой математическую модель обработки.

Представим ряд искомых параметров в виде некоторого множества

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}, \quad (19)$$

где

a_1, a_2, a_3 – искомые параметры.

Соответственно, задача оптимизации и заключается в определении таких значений управляемых параметров a , при которых целевая функция стремится к минимуму.

Как видно из приведённого выше описания целевой функции, часть управляемых параметров оптимизации относится к характеристикам режимов резания, а часть к качеству управляющих программ для ЧПУ оборудования.

Из уравнений режимов резания (17) и уравнений основного времени (15), определим основные управляемые параметры, влияющие на целевую функцию:

- 1) скорость резания – V ,
- 2) глубина обработки – t ,
- 3) подача обработки – S ,

- 4) стойкость инструмента – T ,
- 5) геометрические параметры инструмента,
- 6) длина траекторий обработки – $L_{p.x.}$,
- 7) длина траекторий без обработки («холостых») – $L_{св.х.}$,
- 8) количество врезаний инструмента – $L_{вр.}$.

Выражение 4.2.1 примет вид

$$A = \{V, t, S, T, L_{об}\}. \quad (20)$$

Качество математической модели процессов обработки напрямую зависит от правильного выбора технических ограничений, которые зависят от вида обработки и конкретных условий производства. Основными ограничениями являются:

- 1) режущие возможности инструмента,
- 2) мощность двигателя главного движения станка,
- 3) кинематические характеристики станка,
- 4) шероховатость обработанной поверхности.

Далее определим перечисленные ограничения.

5.3 Режущие возможности инструмента

Как описывалось ранее, скорость резания для фрезерования определяется по формуле

$$V = \frac{C_v D^q}{T^m t^x S_z^y B^u Z^p} K_v.$$

Кинематикой станка скорость резания ограничивается как

$$V = \pi D n / 1000. \quad (21)$$

Приравняем оба выражения и приравняем к нулю:

$$\frac{C_v D^q K_v 1000}{T^m t^x S_z^y B^u Z^p \pi D n} = 0. \quad (22)$$

Преобразуем полученное выражение и выделим произведение $n S_z^y$, для фрезерования неравенство примет вид:

$$n S_z^y \leq \frac{C_v D^q K_v}{T^m t^x B^u Z^p}. \quad (23)$$

Данное ограничение связывает параметры резания, определяемые характеристиками инструмента, и скорость резания, определяемую кинематикой станка.

Подставим значения коэффициентов, принятые из справочной литературы:

$$nS_z^{0,2} \leq \frac{53 \cdot 8^{0,45} \cdot 0,8}{80^{0,33} \cdot 0,2^{0,3} \cdot 0,1^{0,1} \cdot 2^{0,45}} = 38,5$$

5.4 Мощность привода главного движения станка

Затрачиваемая эффективная мощность для различных видов обработки устанавливается формулой:

$$N_{\text{эф}} = \frac{C_z t^x D^{z_z} n^{n_z} S^{y_z} \pi^{n_z} B_{\phi}^{r_z} k_z}{k_{c_z}}. \quad (24)$$

Однако, необходимое условие механической обработки описывается следующим выражением:

$$N_{\text{эф}} \leq N_n \eta. \quad (25)$$

Приравняв эти два выражения, получим ограничение, связывающее мощность привода главного движения и мощность резания:

$$n^{n_z} S^{y_z} \leq \frac{N_n \eta k_{c_z}}{C_z t^x D^{z_z} \pi^{n_z} B_{\phi}^{r_z} k_z}. \quad (26)$$

Подставив значения коэффициентов, принятые из справочной литературы получим:

$$n^{0,8} S^{0,7} \leq \frac{380 \cdot 10000 \cdot 0,8 \cdot 0,9}{300 \cdot 3^{1,0} \cdot 96^{0,85} 3,14^{0,85} \cdot 0,68} = 48,6.$$

5.5 Наименьшая и наибольшая скорости резания и подачи

Просто описываются ограничения по скорости резания, диктуемые производителем станочного оборудования:

$$n \geq n_{\text{ст. min}}, \quad (27)$$

$$n \leq n_{\text{ст. max}}. \quad (28)$$

По паспортным данным станка с ЧПУ минимальная и максимальная скорости резания:

$$n_{ст.мин} = 5\text{м/мин},$$

$$n_{ст.маx} = 5024\text{м/мин},$$

Ограничения по отношению к подаче имеют аналогичный вид:

$$s \geq s_{ст.мин}, \quad (29)$$

$$s \leq s_{ст.маx}. \quad (30)$$

Согласно характеристикам станка:

$$s_{ст.мин} = 90\text{мм/мин},$$

$$s_{ст.маx} = 50000\text{мм/мин}.$$

5.6 Требуемая шероховатость обрабатываемой поверхности

Известно, что на чистовых операциях требуемая шероховатость поверхности зачастую достигается путём занижения рекомендуемых режимов резания, что происходит в силу зависимости достигаемого значения шероховатости от скорости резания и подачи. Данное ограничение учитывает эту зависимость в виде следующего выражения, в основе которого лежат экспериментальные данные [5]:

$$R = k_1 n^{k_2} s^{k_3} t^{k_4} \varphi^{k_5} \varphi_1^{k_6} r^{k_7}, \quad (31)$$

где

φ, φ_1, r – параметры геометрии режущей части инструмента;

k_1, k_2, \dots, k_7 – экспериментально устанавливаемые коэффициенты.

С учётом требуемой шероховатости, после преобразований, получают неравенство:

$$n^{k_2} s^{k_3} \leq \frac{R}{k_1 t^{k_4} \varphi^{k_5} \varphi_1^{k_6} r^{k_7}}. \quad (32)$$

Подставим табличные значения из справочной литературы:

$$n^{0,19} s^{-0,58} \leq 0,16 \frac{10^0 + 14^0 \cdot 10^{0,66} \cdot 1000^{0,19}}{1^{0,29} 0,005 \cdot 3,14^{0,19} 96^{0,19}} = 70. \quad (33)$$

5.7 Определение математической модели

Описанные ограничения позволяют определить математическую модель процесса фрезерования выбранным для чистовой обработки инструментом. Для этого необходимо привести все ограничения и целевую функцию к линейному виду. Методом логарифмирования приведём к линейному виду ограничение по режущим возможностям инструмента:

$$\ln n + y \ln s_z \leq \ln \frac{C_v D^q K_v}{T^m t^x B^u Z^p} . \quad (34)$$

После чего обозначим $\ln(n)=x_1$, $\ln(100s_z)=x_2$, $\ln(\frac{C_v D^q K_v}{T^m t^x B^u Z^p})=b_1$. Получим линейное неравенство:

$$x_1 + 0.2x_2 \leq 3,65.$$

Аналогично поступим с оставшимися ограничениями. Мощность привода главного движения станка:

$$0,8x_1 + 0.7x_2 \leq 3.88;$$

наибольшая скорость резания:

$$x_1 \leq 8.52;$$

наименьшая скорость резания:

$$x_1 \geq 1.6;$$

наименьшая подача:

$$x_1 \geq 5.4;$$

наибольшая подача:

$$x_1 \leq 10.8;$$

требуемая шероховатость поверхности:

$$0.19x_1 - 0.58x_2 \leq 4.2.$$

На данном этапе целевую функцию можно так же привязать к подаче и скорости резания выражением:

$$C = \frac{C_1}{ns}, \quad (35)$$

где C_1 – коэффициент выражающий остальные факторы влияющие на стоимость обработки, но являющиеся постоянными.

При приведении оценочной функции к линейному виду получим:

$$f_0 = x_1 + x_2 \text{ max.} \quad (36)$$

Из этого выражения видно, что минимальному значению себестоимости соответствует максимальное значение произведения параметров резания.

Преобразованные в линейный вид ограничения и оценочная функция вместе образуют математическую модель процесса фрезерования. Далее задача сводится к определению оптимальных значений подачи и скорости резания, решить которую можно графическим методом. Отложив полученные неравенства в виде прямых в одной координатной плоскости, получим ограниченную область решений. Такую область называют многоугольником решений. Так же, в координатной плоскости откладывается вектор Max, являющийся биссектрисой осей, который указывает направление максимизации оценочной функции.

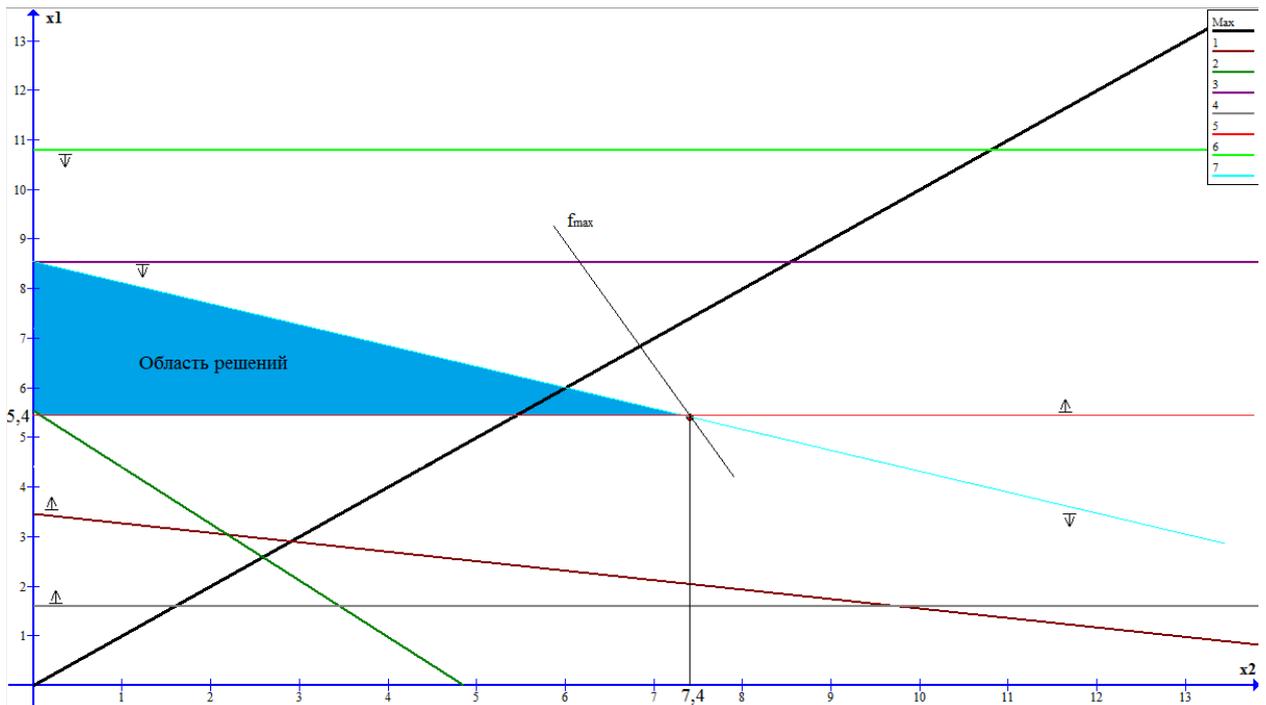


Рисунок 5.7.1 - Оптимальному значению соответствует точка (5.4;7.4).

Перпендикулярная линия от вектора максимизации, в верхней точке касания с областью решений укажет на точку оптимального значения параметров x_1 и x_2 . Результат построения области решений представлен на рисунке 5.7.1.

Вычислим значения оптимальных параметров резания с помощью обратной функции логарифмирования полученных координат точки оптимума:

$$n_{\text{опт}} = e^{5,4} = 220 \text{ м/мин},$$
$$s_{\text{опт}} = e^{7,4} = 1635 \text{ мм/мин}.$$

5.8 Выводы

Данные режимы резания являются оптимальными для применения в обработке, управляющая программа которой была рассчитана в предыдущей главе. Алгоритм определения оптимальных значений скорости резания и подачи универсален для фрезерной обработки на подобных 3-х осевых станках с ЧПУ. Однако, некоторые использованные коэффициенты привязывают разработанную математическую модель к определённым видам инструмента и обрабатываемого материала, что потребует, при их изменении, корректировки математических зависимостей.

Заключение

В данной работе был проведён анализ существующего уровня автоматизации подготовки управляющих программ для оборудования с ЧПУ. Были рассмотрены существующие передовые разработки в области автоматизации, а так же описаны тенденции их развития. Была определена группа типовых деталей, соответствующая определенным технологическим признакам, и выделена одна, на примере которой проводилось дальнейшее исследование. Проведён анализ существующих методов обработки различных поверхностей на станках с ЧПУ.

Была проведена структурная оптимизация существующего технологического процесса обработки типовой детали, а именно:

- создан алгоритм обоснованного выбора типа заготовки;
- обосновано применение универсального оборудования на заготовительных операциях, представлен расчёт себестоимости обработки в зависимости от типа заготовки при помощи средств моделирования механической обработки.

Было выполнено усовершенствование управляющей программы чистового фрезерования формообразующих поверхностей типовой детали, применены различные подходы к обработке, направленные на снижение машинного времени. Получен ряд рекомендаций для последующего применения.

Проведена параметрическая оптимизация процесса чистового фрезерования формообразующих поверхностей типовой детали с использованием методов линейного программирования, а именно: получена математическая модель процесса механической обработки, с помощью которой были определены оптимальные режимы резания для чистовой обработки, управляющие программы которой были написаны в главе 4.

Список использованных источников

1. Ли, К. Основы САПР / К. Ли. - Санкт-Петербург: Изд. Питер, 2004. – С.1 - 22.
2. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Саати. - Москва: Радио и Связь, 1993. – 273 с.
3. Грубый, С. В. Оптимизация процесса механической обработки и управление режимными параметрами / С. В. Грубый. — Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 149 с.
4. Рыжков Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки/Э.В.Рыжков – Киев: Наук. думка, 1989.–197 с.
5. Боровков В. Методические указания по дисциплине «Проектирование заготовок» / В.М. Боровков, А.С. Черемсин – Тольятти: ТГУ, 2002. – 38 с.
6. Сорокин В. Марочник сталей и сплавов/В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Вяткин и др.– Москва: Машиностроение, 1989. – 640 с.
7. Мендельсон В.С. Технология изготовления штампов и пресс-форм/В.С. Мендельсон, Л.И. Рудман – Москва: Машиностроение, 1982.– 207 с.
8. Косиловой А.Г. Справочник технолога – машиностроителя. Том 1 под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985.
9. Косиловой А.Г. Справочник технолога – машиностроителя. Том 2 под ред. Косиловой А.Г. и Мещерякова Р.К. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1985.
10. Зубкова, Н.В. Организация производства и менеджмент: метод. рекомендации / Н. В. Зубкова; ТГУ. - ТГУ. - Тольятти: ТГУ, 2007. - 51 с.
11. Боровков В.М. Заготовки в машиностроении :учеб. Пособие для вузов по спец. 1201 "Технология машиностроения" / В. М. Боровков [и др.]; ТГУ; [науч. ред. О. И. Драчев]. – Гриф УМО; ТГУ. - Тольятти: ТГУ, 2007. - 67 с.
12. Аверкиев Ю. А., Аверкиев А. Ю. Технология холодной штамповки: Учебник для вузов по специальностям «Машины и технология обработки

металлов давлением» и «Обработка металлов давлением». – М.: Машиностроение, 1989. - 304 с.

13. Гельмерих Р., Швиндт П. Введение в автоматизированное проектирование. М: Машиностроение, 2005 г.
14. Михалев О. Н. Повышение степени автоматизации CAD/CAM-систем/ О. Н. Михалев, А. С. Янюшкин// Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 7-ми ч. Ч. 3.– Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007.– С. 25-29.
15. Мартыненко А.А., Шкаберин В.А. Применение онтологического подхода для реализации системы интеллектуального поиска в области САД-, САМ-, САЕ-технологий//Вестник Брянского ТУ -2008- №2 – С. 103-110
16. Схиртладзе А.Г., Ярушин С.Г. Технологические процессы в машиностроении», ПГТУ Пермь 2006.
17. Яблочников Е.И. Методологические основы построения АСТПП Санкт-Петербург: ИТМО, 2005.
18. Козырев А. Ю., Ключков А. Я. История развития систем проектирования [Текст] // Технические науки: традиции и инновации: материалы междунар. науч. конф. (г. Челябинск, январь 2012 г.). — Челябинск: Два комсомольца, 2012. — С. 64-66.
19. Берлинер Э. М. САПР конструктора машиностроителя [Электронный ресурс] :учебник / Э. М. Берлинер, О. В. Таратынов. - Москва: Форум: ИНФРА-М, 2015. - 288 с.: ил. - (Высшее образование). - ISBN 978-5-00091-042-9.
20. Смолин, Е.Л. Основы конструирования штамповой оснастки: учебное пособие [Текст] / Е.Л. Смолин. - Тольятти: ТГУ, 2007. – 72 с.
21. Справочник конструктора штампов: Листовая штамповка / Подобщ. Ред. Л. И. Рудмана. — М.:Машиностроение, 1988. - 496 с.

22. Челищев Б. Е., Боброва И. В., Гонсалес-Сабатер А. Автоматизация проектирования технологии в машиностроении. М.: Машиностроение, 1987. 263 с.
23. Лахтин. Конструкционные материалы и термическая обработка сталей и сплавов. – М.: Машиностроение, 1984 – 370 с.
24. Кондаков А. И. САПР технологических процессов: учебник для вузов/ А.И. Кондаков :учебник для вузов / А. И. Кондаков. - Москва: Академия, 2007.
25. Хусаинов Р.М., Мавзутова Г.Р. Применение средств UnigraphicsNX для решения технологических задач // Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по матер. XXXIII междунар. науч.-практ. конф. № 8(32). – Новосибирск: СибАК, 2015.
26. Duranti, A. Ethnography of Speaking: Toward a Linguistics of praxis [Text] / A. Duranti // Linguistics: The Cambridge Survey. – Cambridge, 1988. – PP. 210-228.
27. Generating milling tool paths for prismatic parts using genetic programming. Jack Barclaya, Vimal Dhokiaa, Aydin Nassehia. 9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14. Received: 24 July 2014 / Accepted: 19 September 2014 / Published online: 9 November 2013
28. Tool orientation optimization and location determination for four-axis plunge milling of open blisks. Yongshou Liang · Dinghua Zhang · Zezhong C. Chen · Junxue Ren · Xiangyu Li. Received: 13 July 2013 / Accepted: 15 October 2013 / Published online: 17 November 2013
29. Practical and reliable carbide drill grinding methods based on a five-axis CNC grinder. Fei Tang · Jiao Bai · Xiaohao Wang. Received: 15 September 2013 / Accepted: 12 March 2014 / Published online: 4 May 2014.
31. Dong J and Stori J A, A generalized time-optimal bi directional scan algorithm for constrained feed-rate optimization, *Journal of Dynamic Systems*,

- Measurement, and Control*, 2006, 128(2):379–390.
32. Dong J and Stori J A, Optimal feed-rate scheduling for high-speed contouring, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2007, 129(1): 63–76.
 33. Ernesto C A and Farouki R T, Solution of inverse dynamics problems for contour error minimization in CNC machines, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, 2010, 49: 589–604.
 34. Guo J X, Zhang Q, and Gao X S, Tracking error reduction in CNC machining by re-shaping the kinematic trajectory, *Journal of Systems Science and Complexity*, 2013, 26(5): 817–835.
 35. Lin M T, Tsai M S, and Yau H T, Development of a dynamics-based NURBS interpolator with real-time look-ahead algorithm, *Int. J. of Mach. Tools and Manu*, 2007, 47: 2246–2262.