

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ
БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

**Разработка стратегии создания инновационных
технологических процессов**

Электронное учебное пособие

САМАРА

2011

Авторы: **Проничев Николай Дмитриевич,
Шулепов Александр Павлович,
Чемпинский Леонид Андреевич,
Мещеряков Александр Викторович**

Рецензент:

зав. каф. «Механической обработки материалов», д-р техн. наук, проф.
Скуратов Д. Л.

Разработка стратегии создания инновационных технологических процессов [Электронный ресурс] : электрон. учеб. пособие / Н. Д. Проничев, А. И. Шулепов, Л. А. Чемпинский, А. В. Мещеряков; Минобрнауки России, Самар. гос. аэрокосм. ун-т им. С. П. Королева (нац. исслед. ун-т). - Электрон. текстовые и граф. дан. (10,3 Мбайт). - Самара, 2011. - 1 эл. опт. диск (CD-RW).

Учебное пособие включает курс лекций, который разделен на две части: блок базовых лекций и блок инновационных лекций, отражающие специфику создания технологических процессов, реализуемых в условиях использования современного высокотехнологического оборудования и современного режущего инструмента.

Учебное пособие предназначено для студентов факультета ДЛА по направлению 160700.68 «Двигатели летательных аппаратов», изучающих дисциплину «Инновационные производственные технологии в двигателестроении» в 9 и А семестрах. Также к инновационному блоку лекций разработаны презентации, которые издаются отдельным мультимедийным пособием.

Разработано на кафедре ПДЛА.

© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2011

СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
БЛОК БАЗОВЫХ ЛЕКЦИЙ	
ТЕМА 1: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ.....	7
1 Объект производства. Структура производственного процесса.....	7
2 Рабочий чертёж и виды поверхностей детали.....	8
3 Типы производства и их признаки.....	12
4 Способы достижения заданных размеров.....	14
ТЕМА 2: ОСНОВЫ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК.....	17
1 Понятие о базах и базировании.....	17
2 Классификация баз.....	22
2.1 Классификация баз по назначению.....	22
2.2 Классификация баз по лишаемым степеням свободы.....	23
2.3 Классификация баз по характеру проявления.....	25
3 Рекомендации к решению задач по базированию.....	27
ТЕМА 3: ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ.....	33
1 Точность и погрешность. Категории и виды точности.....	33
2 Виды совокупности деталей.....	34
3 Взаимосвязь между погрешностями геометрических параметров.....	35
4 Структура (состав) погрешностей геометрического параметра.....	36
5 Определение первичных погрешностей обработки.....	38
5.1 Классификация погрешностей.....	38
5.2 Жёсткость и податливость технологической системы.....	39
5.3 Погрешности, связанные с упругими деформациями технологической системы под действием сил резания.....	41
5.4 Погрешности обработки, обусловленные деформацией заготовки под дей- ствием сил закрепления.....	42
5.5 Определение погрешностей, связанных с упругими деформациями систе- мы под влиянием нагрева.....	44
5.6 Погрешности, возникающие в результате размерного износа инструмента.....	46
5.7 Погрешности, вызванные внутренними остаточными напряжениями.....	48
5.8 Погрешности, связанные с неточностью мерного и профильного инструмента.....	49
5.9 Кинематические погрешности.....	49
5.10 Погрешности, связанные с геометрической неточностью станков.....	49
5.11 Погрешности настройки станков.....	50
6 Определение первичных погрешностей установки.....	51
6.1 Первичные погрешности установки, обусловленные упругими и пласти- ческими деформациями установочной поверхности заготовки под влиянием сил резания и закрепления.....	51

6.2 Первичные погрешности установки, возникающие из-за геометрической и динамической неточности приспособлений.....	52
6.3 Первичные погрешности установки, обусловленные неточностью формы и размеров базирующей поверхности.....	53
6.4 Первичные погрешности установки, обусловленные системой простановки операционных размеров.....	53
6.5 Погрешности установки, возникающие при несовмещении исходной и установочной баз.....	54
7 Определение результирующей операционной погрешности.....	55
7.1 Расчётно-аналитический метод определения суммарной погрешности.....	55
7.2 Статистический метод определения суммарной погрешности.....	57
7.2.1 Метод кривых распределения.....	57
7.2.2 Метод точностных диаграмм.....	59
7.3 Технически достижимая и среднеэкономическая точность обработки...	60
ТЕМА 4: РАСЧЁТ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ.....	62
1 Категории и значения припусков на механическую обработку.....	62
2 Структура минимального операционного припуска.....	63
3 Методы определения припусков на обработку.....	64
4 Операционные допуски и правила их выбора.....	65
5 Основные понятия и определения теории размерных цепей.....	66
6 Методы решения размерных цепей.....	69
7 Способы решения размерных цепей.....	71
8 Расчёт диаметральных операционных размеров.....	72
ТЕМА 5: МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ.....	73
1 Понятие о технической подготовке производства.....	73
2 Виды технологических процессов.....	73
3 Исходные данные для проектирования технологических процессов.....	75
4 Последовательность разработки единичных технологических процессов.....	75
5 Изучение и анализ рабочего чертежа детали.....	75
6 Выбор вида и способа получения заготовки.....	77
7 Разработка плана операций и формирование этапов технологического процесса.....	78
7.1 Выбор числа ступеней обработки поверхностей.....	78
7.2 Определение последовательности обработки поверхностей.....	79
7.3 Выбор технологических баз.....	81
7.4 Формирование операций и разделение технологического процесса на этапы.....	81
7.5 Разработка технических требований на операции.....	82
7.6 Выбор оборудования.....	83
7.7 Экономический анализ вариантов выполнения операций.....	83
7.8 Оформление технологической документации.....	83
8 Автоматизация проектирования технологических процессов (АПТП)...	84
ТЕМА 6: ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	85
1 Нормирование и норма времени.....	85
2 Экономическое обоснование вариантов выполнения операции.....	86

2.1 Сравнение вариантов операций по трудоёмкости.....	86
2.2 Сравнение вариантов операций по технологической себестоимости...87	
2.3 Оценка экономической эффективности дополнительных капитальных вложений.....	88

Блок инновационных лекций: «Разработка технологических процессов изготовления лопаток КВД на современном многокоординатном оборудовании»

Лекция 1: Анализ существующей технологии изготовления рабочих лопаток КВД на предприятиях отрасли.....	90
1 Обработка хвостовиков лопаток компрессора.....	93
2 Обработка пера лопаток.....	98
3 Назначение и условия работы.....	106
4 Конструкция и геометрические характеристики лопатки.....	106
5 Характеристика заготовки и материала детали.....	109
6 Наличие установочных баз при изготовлении детали.....	111
7 Общая характеристика технологичности детали.....	111
Лекция 2: «Создание 3D моделей типоразмеров лопаток КВД и оценка возможности их изготовления из единой заготовки».....	119
1 Разработка 3D моделей лопаток.....	119
2 Проверка условия получения нескольких типов лопаток из одной заготовки.....	132
Лекция 3: «Разработка стратегии инновационного изготовления лопаток КВД с использованием современного инструмента и оборудования»....	
1 Обоснование последовательности обработки элементов лопатки и выбора инструмента.....	138
2 Анализ деформации профиля пера лопатки КВД в программе ANSYS..	146
3 Разработка управляющей программы и карты наладки на операции фрезерования элементов лопатки.....	163
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	166

ВЕДЕНИЕ

Научно-технический прогресс ведет к качественному изменению базы машиностроения, которое поставляет новую технику всем отраслям промышленности, являясь основой их инновационного развития. Задачами машиностроения являются увеличение мощности машин, их надежности и экономичности. С потребностями машиностроения связано появление науки, называемой «Технологией машиностроения».

Название науки – технология – происходит от греческих слов *techné* – ремесло и *logos* – учение, и в широком смысле технология есть совокупность знаний о средствах и способах качественного превращения предметов природы в полезные человеку изделия и продукты.

Технология производства авиационных двигателей является ветвью технологии машиностроения – прикладной науки об изготовлении машин с требуемым качеством в установленном производственной программой количестве в заданные сроки при наименьших затратах живого и овеществленного труда (т.е. наиболее экономичным путем).

Такое определение технологии машиностроения позволяет трактовать её как науку, синтезирующую проблемы технического, организационного характера, а также планирования и экономики.

Технология машиностроения – прикладная наука, базирующаяся как на фундаментальных, так и на общинженерных дисциплинах (инженерной графике, материаловедении, метрологии, методах обработки материалов).

Роль технологии в научно-техническом прогрессе состоит в её возможности реально осуществить те или иные смелые конструкторские разработки. В связи с этим, важной задачей является опережающее развитие технологии, что позволяет существенно увеличить темпы роста основных показателей качества двигателей: разработка новых высоких технологий их изготовления позволяет повысить эти показатели в несколько раз.

В становлении технологии как науки видная роль принадлежит отечественным ученым А.П. Соколовскому, А.А. Маталину, Б.С. Балакшину, В.М. Ковану, А.Б. Яхину, Н.А. Бородачёву, П.И. Ящерицину, С.П. Митрофанову и многим другим. Свой вклад в эту науку внесли и профессорами СГАУ – И.А. Иващенко, А.С. Шевелёвым, Ф.И. Дёминым.

Дисциплина «**Разработка стратегии создания инновационных технологических процессов**» является базовой, где излагаются основные положения науки:

- понятие о ТП механической обработки и его структуре;
- теория базирования;
- теория точности изготовления деталей;
- теория размерных связей;
- расчет припусков на обработку заготовок и назначение допусков на операционные параметры;
- нормирование операций;
- методика проектирования ТП;
- вопросы экономического обоснования технологических решений.

ТЕМА 1: ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

1 Объект производства. Структура производственного процесса

Приступая к изучению основ технологии, необходимо установить понятия об изделии, сборочной единице (СЕ), детали.

Изделием называют продукт конечной стадии производства. Им может быть двигатель, сборочная единица (СЕ) и даже детали одного назначения (завод по изготовлению лопаток энергомашиностроения).

Сборочная единица – элемент изделия, являющийся соединением нескольких деталей. Технологический признак СЕ – возможность её автономного (независимо от других элементов изделия) изготовления.

Деталью называют первичный элемент изделия, признаком которого является отсутствие в нём каких-либо соединений. Иначе – элемент изделия, выполненный из одного материала без применения сборки.

Производственным процессом называют всю совокупность процессов осуществляемых на предприятии с целью превращения материалов и полуфабрикатов в готовое изделие. Это процессы изготовления деталей и СЕ, их сборки, испытаний, транспортировки, планирования, учёта, хранения и др.

Согласно ГОСТ 3.1109-73 **технологический процесс** – это законченная часть производственного процесса, содержащая действия по изменению и последующему определению состояния (формы, размеров, качества материалов) объекта производства.

Различают ТП по отдельным методам их выполнения (ТП штамповки, литья, сварки, пайки, механообработки и др.), а также ТП по объектам производства (ТП дисков, КС, крыльчаток, зубчатых колес и т.д.).

ТП механической обработки, закономерности которого и предстоит изучать, – та часть производственного процесса, которая включает последовательное превращение исходной заготовки в готовую деталь путем изменения формы, размеров и состояния её поверхностей методами обработки материалов.

Характерный признак ТП механообработки – его дискретность, прерывистость. Это вызвано следующими причинами:

- применением различного оборудования (токарных, фрезерных, сверлильных, шлифовальных и других станков);
- использование для обработки заготовок на первом этапе ТП более мощного, но менее точного оборудования, а на последующих этапах – наоборот;
- наличием в ТП механообработки прерывающей его течение термической обработки, искажающей форму и размеры поверхностей, что требует их исправления в последующих операциях.

Отдельные части, на которые делится ТП механообработки называются операциями. **Операция** – законченная часть ТП, характеризующаяся непрерывностью выполнения и постоянством объекта обработки, оборудования и исполнителя.

Операция – это основная единица производственного планирования и учета.

Операция включает в свой состав **установы** – части операции, выполняемые при неизменном (постоянном) закреплении заготовки. Т.о. операция может быть выполнена за один или несколько установов.

Часто операции и установы делятся на **позиции**, которые представляют собой фиксированное положение единой заготовки закрепленной на станке или в приспособлении относительно обрабатывающих инструментов. Т.о. в позиции выполняется часть операции. Замена установов позициями повышает производительность обработки.

В состав операции входят **переходы** – это части операций, характеризующиеся постоянством применяемого инструмента и обрабатываемых поверхностей. Используются **простые переходы** (в работе один инструмент) и **сложные** (работают одновременно несколько инструментов) (**рисунок 1**).

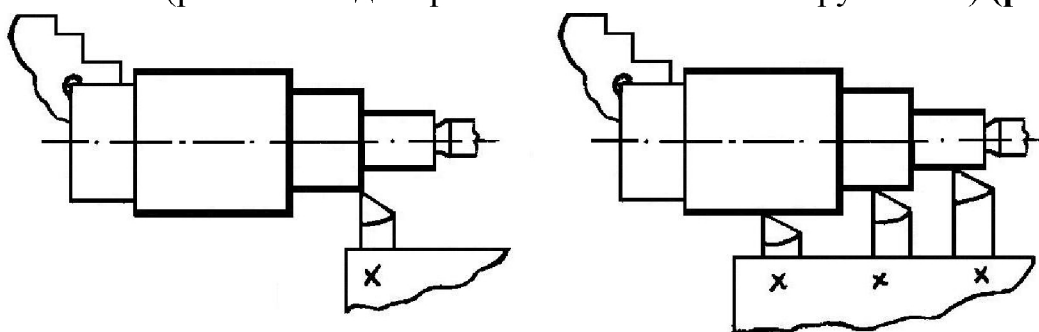


Рисунок 1 – Переходы операции

В дополнение к основным переходам, связанным непосредственно с обработкой поверхностей заготовки, в составе операции входят и вспомогательные переходы, состоящие из действий станочника (или оборудования) по установке и снятию заготовки, смене инструментов, измерениям и т.п.

Переходы делятся на **проходы**.

Проход - это законченная часть технологического перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождающаяся изменением формы, размеров и состояния поверхности заготовки. Т.е. - это часть перехода по снятию одного слоя металла.

Деление переходов на проходы невыгодно и к нему прибегают, когда невозможно снять весь припуск по соображению мощности станка, прочности детали и инструмента.

Проходы делятся на **ходы**. **Ход** - элементарная составная часть прохода.

По назначению ходы подразделяются на:

1. **Рабочий ход**- ход инструмента по изменению состояния заготовки.
2. **Позиционирующий ход** - точное перемещение инструмента из одного положения в другое, при котором не происходит обработка.
3. **Холостой ход** - применяется для подвода инструмента в зону обработки, как правило, на повышенных подачах (скоростях).

Операции классифицируются по следующим признакам:

- по типу применяемого оборудования (токарные, фрезерные, сверлильные, шлифовальные и др. станки);
- по месту в ТП (сначала черновые, затем – чистовые, окончательные, отделочные и пр.);
- по количеству переходов в операции.

По последнему признаку операции можно разделить на дифференцированные (одно- и малопереходные) и концентрированные (многопереходные).

Дифференцирование операций упрощает их выполнение, конструкцию станочных приспособлений и наладку станков, позволяет использовать рабочих с невысокой квалификацией. Однако, при этом растет количество операций, удлиняется цикл изготовления детали, усложняется планирование производства и учет.

Концентрированные операции сокращают их количество в ТП, упрощают организацию и планирование производства и учет его состояния, сокращается и номенклатура используемых приспособлений. Но концентрированные операции предполагают использование квалифицированных исполнителей, более сложных по конструкции приспособлений, усложняется и наладка станков.

Различают три вида концентрации:

- организационную;
- техническую;
- технологическую.

Организационная концентрация состоит в увеличении числа простых переходов в составе операции. Такие операции характерны для станков с ЧПУ.

Механическая концентрация предполагает замену установов позициями, механическую смену инструментов.

Технологическая концентрация основана на использовании сложных переходов, когда одновременно работают несколько инструментов, что характерно для операций, выполняемых на revolverных, многооперационных, агрегатных станках и станках – автоматах.

И дифференцированные и концентрированные операции применяются для повышения производительности труда в различных по объёму выпуска и сложности изделий условиях производства.

2 Рабочий чертёж и виды поверхностей детали

Все требования, предъявляемые конструктором для обеспечения качественного функционирования детали в СЕ и изделии, содержатся в её рабочем чертеже. **Рабочий чертёж** – единственный документ, отражающий весь комплекс геометрических, физико-механических и других параметров. Все они защищаются допусками и однозначно не задаются.

В зависимости от функционального назначения поверхности детали разделяются на исполнительные и свободные.

К исполнительным относятся основные и вспомогательные конструкторские поверхности, а также рабочие поверхности.

Основными конструкторскими поверхностями деталь монтируется в заданное положение в изделии при его сборке. Вспомогательные конструкторские поверхности служат для установки по ним других деталей, собираемых с рассматриваемой.

Рабочие поверхности участвуют в рабочем цикле изделия, передавая силы, моменты сил, контактируя с рабочим телом двигателя.

Естественно, что все названные поверхности отличаются высокой точностью (вплоть до 5 кв.) и малой шероховатостью (Ra 1,25 мкм и менее), а между собой связаны жесткими ТТ к точности взаимного расположения (например, концентричность 0,01...0,03 мм не более).

Свободные поверхности лишь оформляют конфигурацию детали. Их точность не превышает 9 кв, но шероховатость в некоторых случаях может быть и малой, вплоть до $Ra=0,63...0,32$ мкм (например, у поверхностей полотна диска турбины). Точность расположения этих поверхностей относительно конструкторских задается в пределах 0,05...0,1 мм (**рисунок 2**).

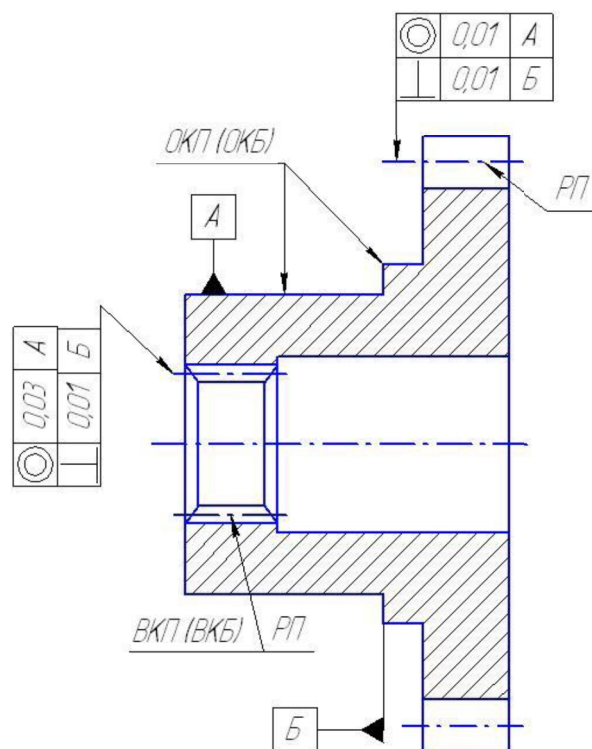


Рисунок 2 - Исполнительные поверхности детали: основные (ОКП), вспомогательные (ВКП) и рабочие (РП) поверхности, остальные - свободные

В процессе изготовления детали на всех его стадиях обработке подвергается заготовка, и только с последнего станка в этом процессе снимают полностью изготовленную деталь.

На заготовке, находящейся в процессе обработки, указываются такие поверхности: **установочные**, поверхности под закрепление, **обрабатываемые** и **измеряемые**. **Установочными** поверхностями заготовка ориентируется на станке, а назначение и признаки других поверхностей ясны из их названия.

Отметим, что среди обрабатываемых поверхностей могут быть либо элементарно обрабатываемые (ЭОП), либо конструктивно-технологические элементы (КТЭ). Первые возникают за счёт, например, вращений образующей вокруг оси (цилиндры), или при перемещении образующей параллельно самой себе вдоль прямой (плоскости). Вторые представляют совокупность поверхностей, получаемых при обработке одним инструментом, движущимся по сложной траектории (канавки, резьбы, эвольвенты и др.)

Всё, сказанное о рабочем чертеже детали, относится в равной мере к таковым для сборочных единиц и изделий.

Все поверхности и их взаимное расположение характеризуются набором следующих геометрических характеристик:

1. Форма поверхности - это понятие обычно не связывается с какими-либо величинами. Её можно охарактеризовать, если представить в виде отдельных элементарных геометрических образов или фигур (цилиндр, плоскость, шар, конус).

2. Размеры - это геометрические размеры какой-либо поверхности. Различают размеры **1-го** и **2-го** рода.

Размеры 1-го рода характеризуют геометрический размер какой-либо поверхности. Они образуются, как правило, по схеме **двухсторонней обработки**, т.е. когда поверхности или участки одной поверхности, связанные размером, обрабатываются одновременно.

Размеры 2-го рода (координирующие) - они координируют положение обрабатываемой поверхности относительно другой, являющейся базой. Получаются по схеме **односторонней обработки**, т.е. поверхности, связанные размером, обрабатываются отдельно.

3. Соотношения - геометрические параметры, характеризующие взаимное расположение поверхностей: соосность, параллельность и перпендикулярность плоскостей и осей, биения поверхностей т.п. Обеспечение этих параметров зависит в основном от схемы базирования и установки заготовки в приспособлении. Соотношения характеризуются с помощью **предельных отклонений взаимного расположения поверхностей** (непараллельность, неперпендикулярность, несоосность, биение, смещение от номинального положения и др.) и **погрешностями (отклонениями) формы** (неплоскостность, некруглость, нецилиндричность, непрямолинейность и др.).

Отклонения от геометрической формы влияют лишь на точность размеров I вида и поэтому должны входить в допуск на эти размеры, либо оговариваться в технических требованиях рабочего чертежа.

Отклонения формы и расположения поверхностей влияют на точность размеров II вида и поэтому должны входить в допуск на эти размеры, либо оговариваться в ТТ рабочего чертежа.

Все эти положения иллюстрируются соответствующими примерами (**рисунок 3**).

Обеспечение требуемых характеристик геометрических параметров и шероховатости поверхностей – главная задача ТП изготовления детали.

Физико-механические и иные параметры определяются выбором материала детали, его свойствами, которые приобретаются соответствующей термической, химико-термической и другими видами обработки (покрытия,

ППД и пр.). В результате этих процедур деталь приобретает требуемые для её нормального функционирования свойства.

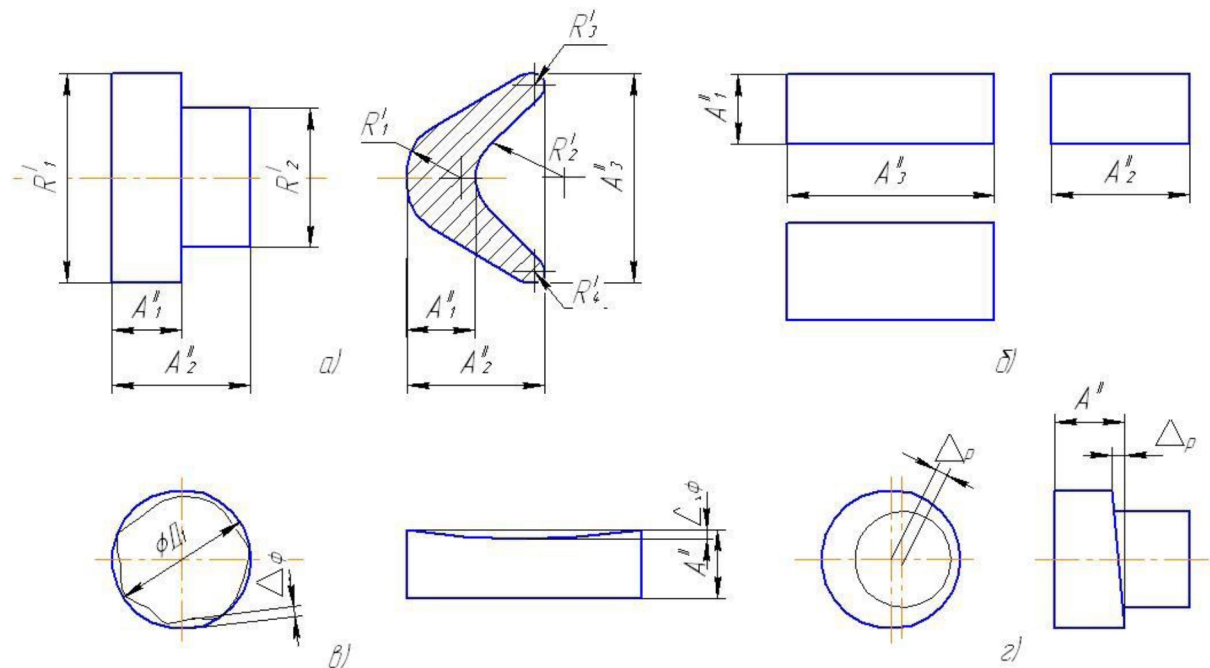


Рисунок 3 - Геометрические параметры детали
 а), б) Размеры I (A^I) и II (A^{II}) вида; в) Отклонение формы (Δ_f);
 г) Отклонение расположения (Δ_p)

3 Типы производства и их признаки

Любой ТП проектируется с учётом типа организации производства (типа производства), в котором он будет осуществляться.

Различают три основных типа производства – массовое, серийное и единичное. Серийное производство, в свою очередь, разделяется на мелко-, средне-, и крупносерийное. При этом по своим характеристикам мелкосерийное производство приближается к единичному, а крупносерийное – к массовому (рисунок 4).

Тип производства определяется номенклатурой изделий, программой выпуска и трудоемкостью изготавливаемых деталей.

По ГОСТ 3.1108-74 тип производства характеризуется коэффициентом закрепления операций $K_{з.о.}$:

$$K_{з.о.} = \frac{O}{P},$$

где O – количество операций за один месяц;

P – количество рабочих мест, где эти операции выполняются.

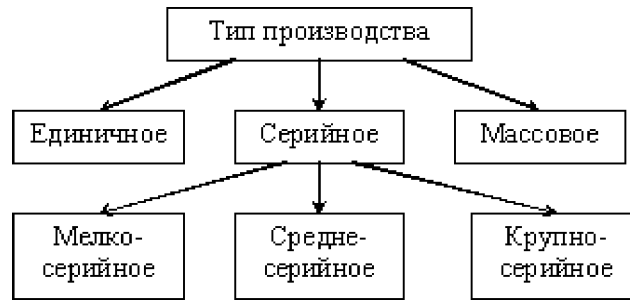


Рисунок 4 – Типы производства

При $1 \leq K_{3.0} \leq 10$ имеет место массовое и крупносерийное производство, $10 < K_{3.0} \leq 20$ - среднесерийное, при $20 < K_{3.0} \leq 40$ - мелкосерийное производство, единичное производство коэффициентом $K_{3.0}$ не регламентируется.

Важной характеристикой типа производства является движение заготовок по рабочим местам.

В массовом и крупносерийном производствах движение заготовок от одного рабочего места на другое непрерывное, поточное. В поточном производстве используют и дифференцированные операции и концентрированные. Первые выполняют на специальных высокопроизводительных станках, а вторые – на полностью автоматизированных поточных линиях. Всё оборудование размещено строго по технологической цепочке, а заготовки перемещаются поодиночке, на конвейере.

Для мелко- и среднесерийного производства характерно движение заготовок от станка к станку **партиями**. **Партия** – группа деталей одного наименования, запускаемых в обработку одновременно. Станок, закончивший обработку партии заготовок, переналаживают на другую операцию.

Это позволяет иметь оптимальное количество станков и рабочих и исключить дефицит потребных деталей в сборочном цехе. Это означает, что на одном и том же станке приходится выполнять ряд однотипных операций для различных партий. Размер партии определяется по зависимости:

$$П = \frac{N}{Д} f,$$

где $П$ – размер партии; шт.;

N – годовая производственная программа, шт./год;

$Д$ – количество рабочих дней в году;

f – коэффициент незавершенного производства.

Коэффициент f показывает, какой запас данных деталей имеется на сборке для её бесперебойного выполнения. Коэффициент f изменяется в широких пределах – от 10 до 30 и более в зависимости от сложности деталей, трудоемкости обработки и сборки.

По размеру $П$ партии определяют количество запусков тех или иных заготовок для изготовления деталей. Чем больше размер партии, тем меньше переналадок станков, простоев оборудования, но больше и объем незавершенного производства, и наоборот.

Количество партий запуска в год

Диски ТНА	12
Крыльчатки насосов	6
Валы средних габаритов	4
Лопатки рабочие и сопловые	12
Зубчатые колеса	6
Корпуса средних габаритов	4
Арматура (стаканы подшипников, втулки)	4
Метизные детали (винты, штифты, шпильки)...	2

В производстве авиационных двигателей производство, как правило, мелкосерийное и серийное, однако для некоторых деталей могут применяться методы поточного производства (лопатки турбин и компрессоров).

Для единичного производства характерно применение универсального оборудования, размещаемого по типам станков, использование квалифицированной рабочей силы и высококонцентрированных операций.

Тип производства оказывает значительное влияние на структуру технологического процесса. Так для серийного производства характерны техпроцессы со следующими признаками: **1.** Чёткое разделение операций на черновые, чистовые и отделочные; **2.** Обработка партиями; **3.** Применение различного оборудования как универсального, так и специального; **4.** Оборудование расставляется последовательно по технологическому процессу; **5.** На рабочем месте выполняются несколько повторяющихся операций.

4 Способы достижения заданных размеров

При обработки деталей на металлорежущих станках используются два принципиально различных способа достижения заданных размеров.

1. Способ индивидуального получения размеров (способ пробных проходов и промеров). При этом методе станки предварительно не настраиваются, а заданные размеры обеспечиваются путём пробных проходов и промеров.

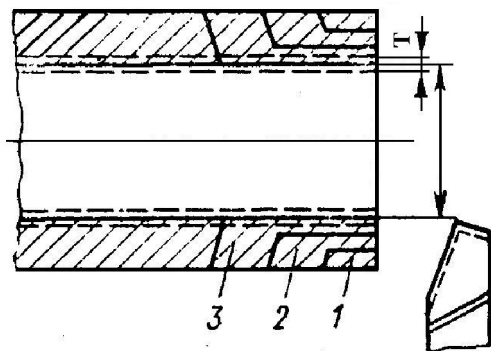


Рисунок 5 – Способ пробных проходов и промеров

Сначала обрабатывают небольшой участок (**1**) поверхности на размер, заведомо больше заданного и проводят измерение (**рисунок 5**). Затем перемещают резец и делают второй проход (**2**), снова измеряют полученный размер и т.д. При получении размера в пределах допуска производят обточку на

всей длине поверхности. При обработке следующей заготовки все действия рабочего повторяются.

Достоинства способа: простота и возможность на обычном оборудовании получать высокую точность обработки (5-7 кв.).

Недостатки способа: большая трудоёмкость и стоимость, низкая производительность, вероятность появления брака.

Способ используется в основном в единичном и мелкосерийном производстве. В тоже время при обработке заготовок на шлифовальных станках этот способ находит применение в серийном производстве (компенсирует износ абразивных инструментов, часто протекающий неравномерно и снижающий точность)

2. Способ автоматического получения заданных размеров - обработка осуществляется на предварительно настроенном оборудовании.

Этот способ может быть реализован по-разному.

1. Заданные размеры получаются автоматически после настройки станка (**рисунок 6**). Станок настроен на автоматическое получение размеров A_1 и A_2 . В процессе обработки рабочий только устанавливает и снимает заготовки, включает и выключает подачи.

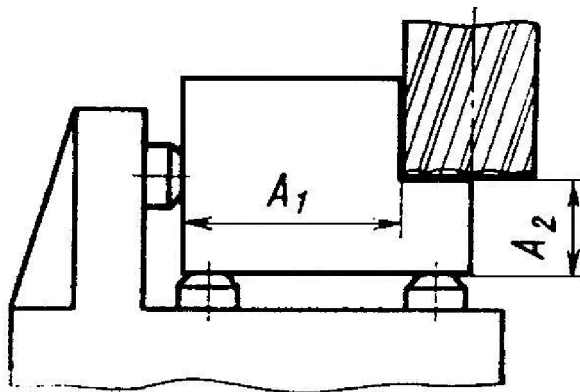


Рисунок 6 – Фрезерование заготовки по размерам A_1 и A_2

2. Заданные размеры получаются автоматически за счёт применения специальных приспособлений, например **кондукторов** (**рисунок 7**).

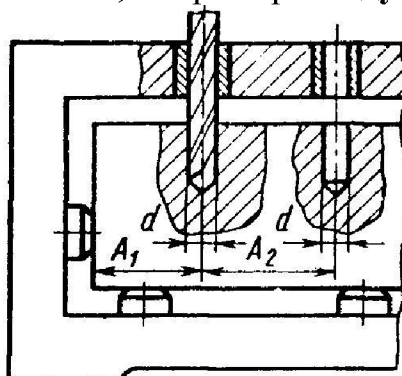


Рисунок 7 – Способ автоматического получения заданных размеров при сверлении по кондуктору

В данном случае размеры A_1 и A_2 обеспечиваются за счёт того, что инструмент (сверло) направляется кондукторными втулками, расположенными на определенном расстоянии от установочной базы и между осями отвер-

ствий. Разновидностью способа автоматического достижения заданных размеров является обработка с использованием мерных режущих инструментов (сверл, зенкеров, разверток и др.).

Способ используется в массовом и серийном производстве.

Достоинства - высокая производительность (отсутствие потерь времени на настройку); повышение качества продукции (повышение точности и снижение брака); обеспечение стабильности процесса обработки.

Недостаток - необходимость использования специальных приспособлений и контролирующих приборов. Однако в условиях крупносерийного и массового производства затраты на них быстро окупаются.

Следует отметить, что на практике эти способы применяются как по отдельности, так и в сочетании один с другим.

ТЕМА 2: ОСНОВЫ ТЕОРИИ БАЗИРОВАНИЯ ЗАГОТОВОК

1 Понятие о базах и базировании

Задачи определения положения детали в машине и в процессе её контроля, заготовки при обработке на станке или их базирование занимают центральное место в процессе создания машины. От того, как они решены, во многом зависит качество деталей и машины в целом.

Вопросам базирования и в нашей стране, и за рубежом уделено большое внимание и посвящено немало специальных научных трудов. Большой вклад в разработку теории базирования внесен учеными Б.С. Балакшиным, А.И. Кашириным, В.М. Кованом, А.А. Маталиным, А.П. Соколовским, В.П. Фирого и многими другими.

Теорию базирования разрабатывали в двух направлениях. Первое из них преследовало цель обобщения опыта машиностроения и классификации баз в соответствии с терминологией, порожденной практикой. Результатом этого направления явилась чрезвычайно обширная и недостаточно строгая терминология, пользование которой было сопряжено с немалыми трудностями. Основу другого научного направления составила теоретическая механика, ее раздел об определении положения твердого тела в пространстве. Основоположником этого направления был Б.С. Балакшин, разработавший в 40-х годах теорию базирования, положенную в основу ГОСТ 21495–76 "Базирование и базы в машиностроении", созданного под его руководством.

Теоретическая механика рассматривает два состояния твердого тела: покоя и движения. Понятия "покоя" и "движения" являются относительными и имеют смысл только тогда, когда указана система, отсчета.

Требуемое положение или движение твердого тела относительно выбранной системы отсчета достигается наложением геометрических или кинематических связей.

Связями в теоретической механике называют условия, которые налагают ограничения либо только на положение, либо также и на скорость точек тела. В первом случае связь называют геометрической, во втором – кинематической.

Связи обычно осуществляются в виде различных тел, стесняющих свободу движения данного тела. Эффект действия связей такой же, как и действие сил, вследствие чего действие связей можно заменить соответствующими силами, называемыми реакциями связей.

Независимые перемещения, которые может иметь тело, называют степенями свободы. Абсолютно твердое тело имеет **шесть степеней свободы**. Для того чтобы придать телу необходимое положение и состояние покоя относительно выбранной системы отсчета, его надо лишить шести степеней свободы, наложив на него шесть двусторонних геометрических связей.

Если избрать в качестве системы отсчета прямоугольную систему координат **XYZ (рисунок 1)**, то при наложении **шести** геометрических связей тело лишится трех перемещений вдоль осей **OX**, **OY** и **OZ** и трёх поворотов вокруг осей, параллельных им, оставаясь неподвижным в системе **XYZ**.

Аналитическое определение требуемого положения абсолютно твердого тела сводится к заданию значений шести независимых параметров, однозначно характеризующих его положение. Сделано это может быть различными способами.

Первый - с телом связывают неизменно прямоугольную систему координат $O_1X_1Y_1Z_1$, называемую **подвижной**. Её положение в системе $OXYZ$ характеризуют координаты x, y, z начала O_1 и три угла Эйлера: θ – угол нутации, ψ – угол прецессии и φ – угол собственного вращения системы $O_1X_1Y_1Z_1$. По значениям этих параметров судят о положении как системы $O_1X_1Y_1Z_1$, так и самого тела относительно системы $OXYZ$, являющейся системой отсчёта.

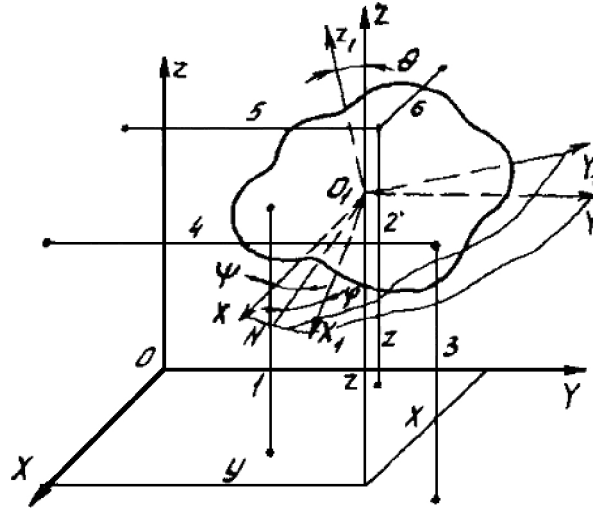


Рисунок 1- Геометрические связи и координаты, определяющие положение твёрдого тела в системе $OXYZ$

Второй способ - на плоскости $O_1X_1Y_1Z_1$ выбирают три точки, не лежащие на прямой линии, на $O_1X_1Y_1Z_1$ – две, на $O_1X_1Y_1Z_1$ – одну и задают значения их координат (рисунок 2). Поскольку параметры $x, y, z, \theta, \psi, \varphi$ аналитически связаны со значениями координат этих шести точек, то такой способ характеристики положения тела в системе $OXYZ$ равнозначен первому способу.

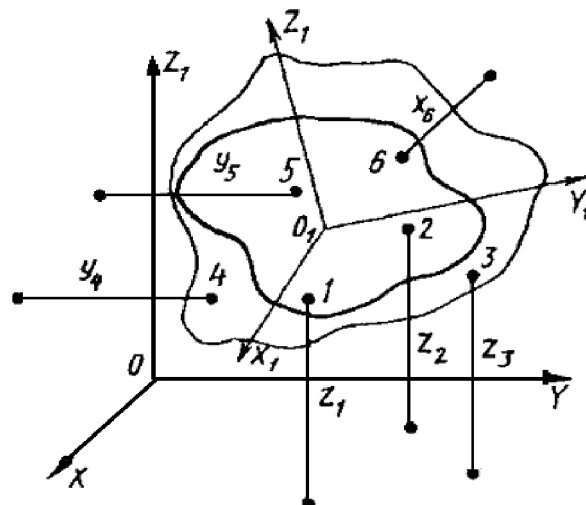


Рисунок 2 - Определение положения твердого тела с использованием координат шести точек, размещенных на плоскостях подвижной системы $O_1X_1Y_1Z_1$

Тело находится в неподвижном состоянии, если выполняются условия:

- сумма всех активных сил, действующих на тело, и реакций равна нулю;
- в начальный момент скорость тела также равна нулю.

Если в избранной системе отсчёта требуется создать движение тела с определенной скоростью в одном или нескольких направлениях, то соответствующее число геометрических связей должно быть заменено таким же числом кинематических связей.

Исходя из вышесказанного, можно дать определение **базированию**.

Под базированием в машиностроении понимают придание **заготовке** или **изделию** требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Под изделием подразумевают деталь, сборочную единицу, а также режущий и измерительный инструмент, приспособления, приборы и другие объекты, допускающие их представление как абсолютно твердых тел.

На **рисунке 3** приведены примеры различных объектов базирования в зависимости от задач базирования.

Понятие "объект базирования"

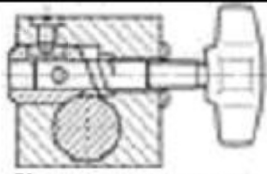
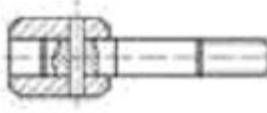
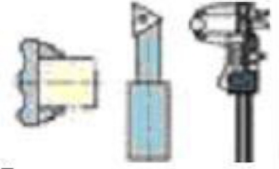
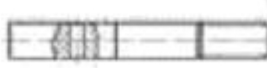
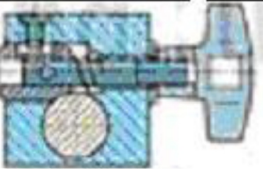
При проектировании изделия	При изготовлении составных частей	При сборке изделий
 Конструкция изделия	 Заготовка	 Деталь
 Конструкция сборочной единицы	 Технологическая оснастка	 Сборочная единица
 Конструкция деталь	 Деталь	 Изделие

Рисунок 3 – Объекты базирования

Придание детали требуемого положения в избранной системе координат осуществляется в реальной ситуации путём соприкосновения её поверхностей с поверхностями детали или деталей, на которые её устанавливают или с которыми её соединяют. Фиксация достигнутого положения и постоянство контакта обеспечиваются силами, в числе которых первым проявляется действие массы самой детали и сил трения.

Реальные детали машин ограничены поверхностями, имеющими отклонения формы от своего идеального прототипа. Поэтому базируемая деталь может контактировать с деталями, определяющими её положение лишь на отдельных элементарных площадках, условно считааемых точками контакта.

В общем случае при сопряжении детали по трём поверхностям с деталями, базирующими её, возникает **шесть точек контакта**. При этом на контактирующих поверхностях точки контакта распределяются определенным образом.

На рисунке 4 показана деталь 1 - прямоугольный параллелепипед, установленная в "угол", образованный базирующими деталями 2. **Шесть точек контакта** распределились на поверхностях детали (соответственно и на поверхностях деталей, на которые она установлена) следующим образом: три точки контакта на нижней поверхности детали, две на боковой поверхности наибольшей протяженности и одна на торцовой поверхности.

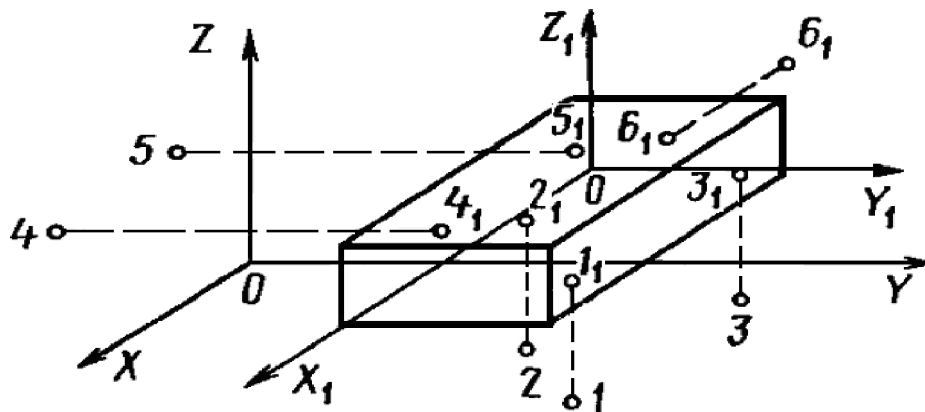


Рисунок 4 - Базирование детали в координатной системе XYZ

Из рассмотренного примера видно, что базирование детали было осуществлено с помощью нескольких её поверхностей – **баз**.

База - поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования.

На рисунке 5 приведены примеры баз.

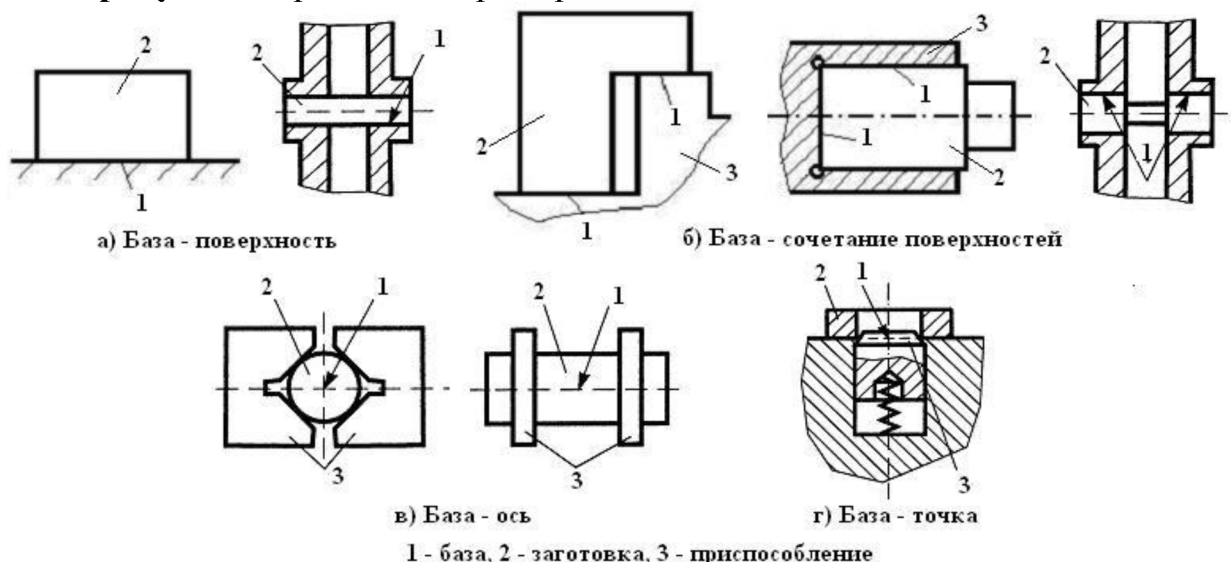


Рисунок 5 – Примеры баз

При базировании призмы (рисунок 4) у присоединяемой детали 1 базами являются поверхности, на которых построены координатные плоскости $X_1O_1Y_1$ и $X_1O_1Z_1$ и $Y_1O_1Z_1$, а базами деталей 2 поверхности, на которых построены плоскости XOY и XOZ и YOZ . Тогда координаты $1_1 - 1$, $2_1 - 2$, $3_1 -$

3, 4₁ - 4, 5₁ - 5, 6₁ - 6 определяют положение детали 1. В результате совмещения баз детали 1 с базами деталей 2 координаты превратятся в шесть **опорных точек** (рисунок 6).

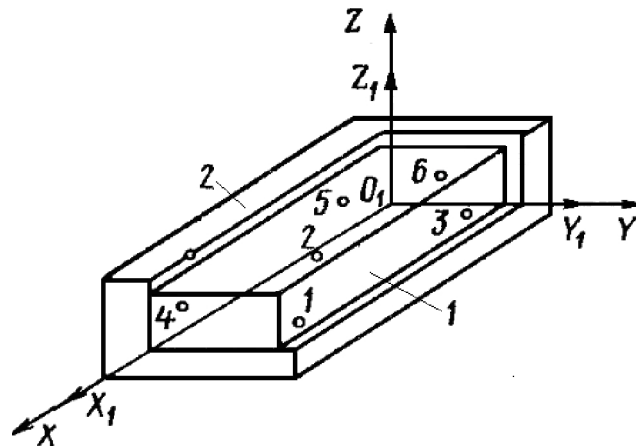


Рисунок 6 - Базирование детали при совмещении координатных систем

Таким образом, получим **правило шести точек**, согласно которому для определения положения детали, рассматриваемой как абсолютно твердое тело, относительно другой детали (других деталей) необходимо и достаточно иметь **шесть опорных точек**, где каждая опорная точка лишает деталь одной степени свободы.

Опорная точка – это символ одной из связей заготовки или изделия с выбранной системой координат. Условное изображение опорной точки по ГОСТ 21495-93 показано на рисунке 7.

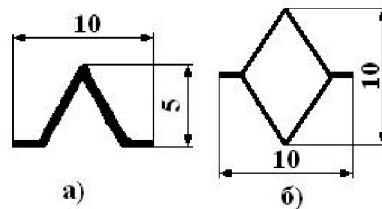


Рисунок 7 - Условное изображение опорной точки
а – вид спереди и сбоку; б – вид сверху

Совокупность трёх баз, образующих систему координат заготовки или изделия, называют **комплексом баз**. Комплекс баз может быть образован сочетанием поверхностей разных размеров и конструктивных форм (плоских, цилиндрических, конических и др.), и распределение шести связей между ними может быть различным.

Схему расположения опорных точек на базах заготовки, детали или изделия называют **схемой базирования**.

Правила изображения опорных точек:

1. Все опорные точки на схеме базирования нумеруют порядковыми номерами, начиная с базы, на которой располагают наибольшее число опорных точек.
2. Число проекций детали на схеме базирования должно быть достаточным для чёткого представления о размещении опорных точек.

3. При наложении в какой-либо проекции одной опорной точки на другую, изображают одну точку и около неё проставляют номера совмещенных точек.

На рисунке 8 показаны схемы базирования призматической и цилиндрической деталей.

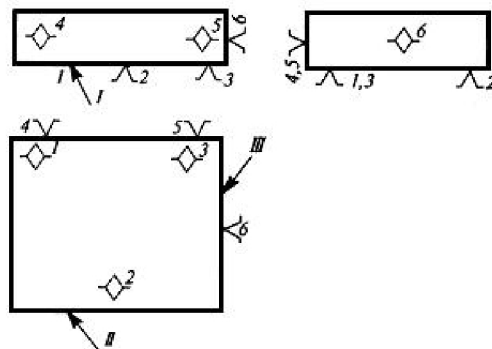


Рисунок 8 – Схема базирования

2 Классификация баз

Базы классифицируют по трём признакам:

- по назначению,
- по лишаемым степеням свободы,
- по характеру проявления.

2.1 Классификация баз по назначению

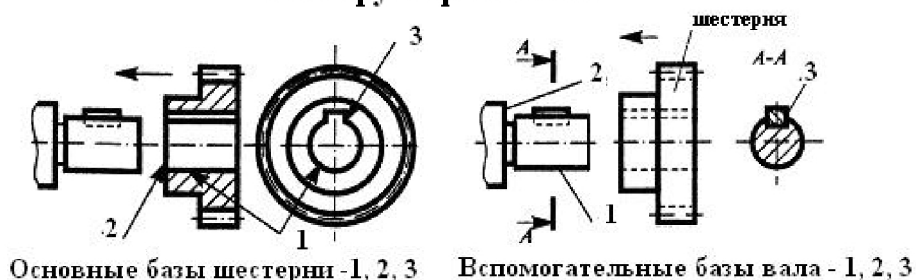
Базирование необходимо на всех стадиях создания изделия: при конструировании и рассмотрении его в сборе, при изготовлении и измерении. Отсюда вытекает необходимость разделения баз по назначению на три вида: **конструкторские, технологические и измерительные (рисунок 9).**

Классификация баз

Виды баз по назначению



Конструкторские базы



Основные базы шестерни - 1, 2, 3 Вспомогательные базы вала - 1, 2, 3

Рисунок 9 – Виды баз по назначению

Конструкторские базы - базы, используемые для определения положения детали или сборочной единицы в изделии. Конструкторские базы делятся на две группы.

1. Основная - база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения её положения в изделии.

2. Вспомогательная - база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения положения присоединяемого к ней изделия (детали или сборочной единицы).

Любая деталь может иметь только один комплект основных баз и столько комплектов вспомогательных баз, сколько деталей или сборочных единиц к ней присоединяется.

Технологические базы - базы, используемые для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления или ремонта (рисунок 10).

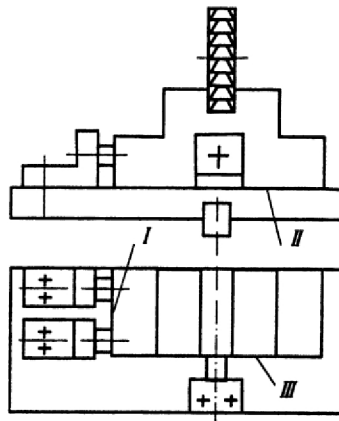


Рисунок 10 - Технологические базы

Понятие технологической базы распространяется на все стадии процесса изготовления изделия (на изготовление детали механической обработкой, на сборку изделия и т.д.).

Измерительные базы - базы, используемые для определения относительного положения заготовки или изделия и средств измерения (рисунок 11).

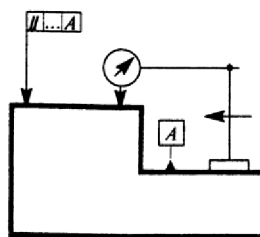


Рисунок 11 - Измерительные базы

Измерительные базы необходимы во всех случаях измерений (при оценке точности детали, в процессе настройки станков и т.д.).

2.2 Классификация баз по лишаемым степеням свободы

Базы, составляющие комплект, различаются лишаемыми степенями свободы и их числом и в соответствии с этим могут быть: **установочными, на-**

правляющими, опорными, двойными направляющими и двойными опорными (рисунки 12, 13).

Установочная база – база, лишаящая заготовку или изделие трёх степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворотов вокруг двух других осей (рисунок 13).



Рисунок 12 - Классификация баз по лишаемым степеням свободы

Направляющая база – база, лишаящая заготовку или изделие двух степеней свободы – перемещения вдоль одной координатной оси и поворота вокруг другой оси.

Опорная база - база, лишаящая заготовку или изделие одной степени свободы – перемещения вдоль одной координатной оси или поворота вокруг оси.

Комплект баз, в состав которого входит **установочная, направляющая и опорная** базы является весьма распространенным и считается **типовым**.

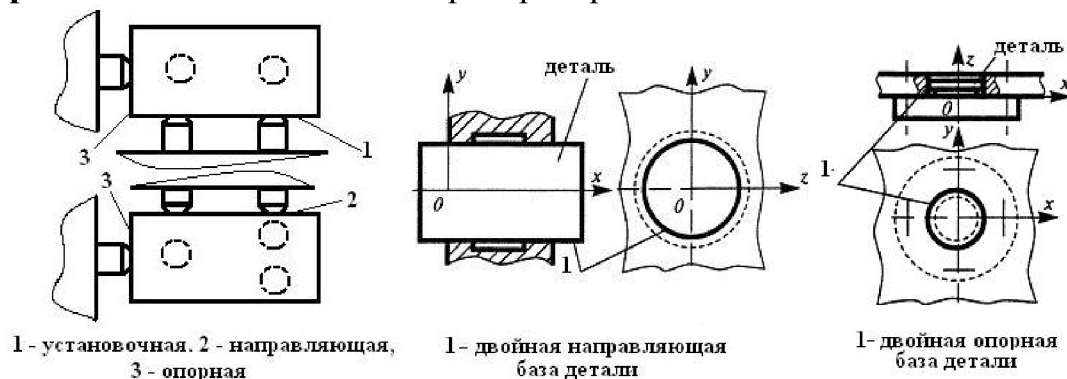


Рисунок 13 - Виды баз по лишаемым степеням свободы

Если базирование детали или заготовки осуществляется с использованием цилиндрической (конической) поверхности большой протяженности (соотношение ее длины и диаметра больше единицы), то с помощью этой поверхности на деталь или заготовку можно наложить четыре связи. Такая база получила название **двойной направляющей**.

Двойная направляющая база - база, лишаящая заготовку или изделие четырех степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей и поворотов вокруг осей, параллельных им.

Часто двойную направляющую базу образует сочетание двух цилиндрических или конических поверхностей небольшой протяженности. Например, две опорные шейки вала, по которым его базируют на подшипниках в корпу-

се, или – конические отверстия, с помощью которых заготовку вала устанавливают в центрах на токарном станке (**рисунк 14**).

Комплект из двойной направляющей и двух опорных баз широко распространен и считается **типовым**.

Двойная опорная база – база лишаящая заготовку или изделие двух степеней свободы – перемещений вдоль двух координатных осей.

В отличие от направляющей базы, с помощью которой деталь лишается одного перемещения и одного поворота, двойную опорную базу используют для лишения детали двух перемещений.

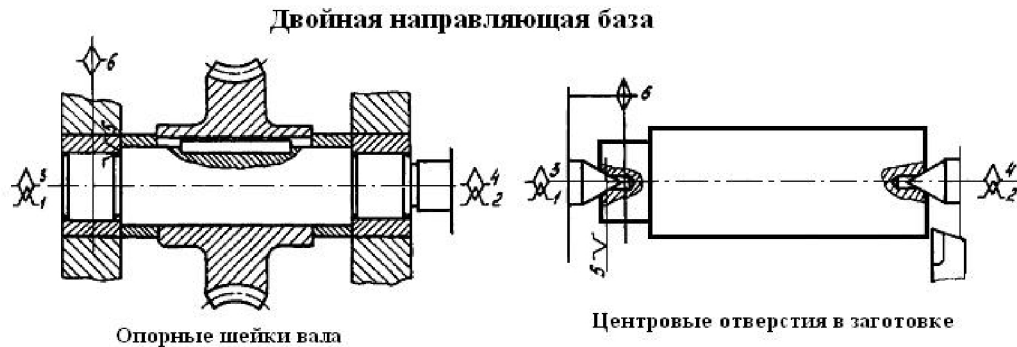


Рисунок 14 - Реализация двойной направляющей базы сочетанием двух поверхностей

Комплект из установочной, двойной опорной и опорной баз также считается **типовым** комплектом баз.

2.3 Классификация баз по характеру проявления

Третий признак классификации разделяет базы на два вида: **скрытые** и **явные**.

Скрытая база – база заготовки или изделия в виде воображаемой плоскости, оси или точки (**рисунк 15**).

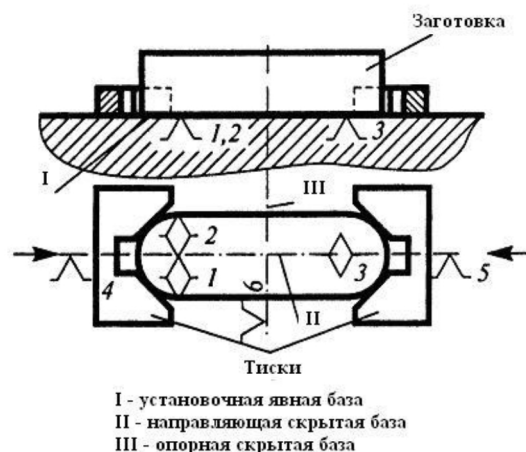


Рисунок 15 - Классификация баз по характеру проявления

К скрытым базам прибегают, когда требуется определить положение детали или заготовки с использованием плоскостей симметрии, оси или пересечения осей.

Наложение связей на скрытые базы может быть осуществлено либо на глаз, либо с помощью специальных технических средств. В первом случае человек, оценивая положение воображаемых координатных плоскостей относительно системы отсчета, придает нужное положение детали или заготовке. Например, установка заготовки (плитки) на магнитной плите плоскошлифовального станка.

В ряде случаев скрытые базы стараются материализовать и превратить их в явные, что позволяет сократить затраты времени на базирование.

Явная база - база заготовки или изделия в виде реальной поверхности, разметочной риски или точки пересечения рисок.

На **рисунке 16** приведена схема классификации баз по трём признакам.



Рисунок 16 - Классификация баз

Согласно этой схеме полное название базы должно охватывать три классификационных признака в принятой очередности. Так, базы, определяющие положение вала, показанного на **рисунке 14**, имеют следующие названия: конструкторская основная, двойная направляющая, скрытая; конструкторская основная, опорная, явная; конструкторская основная, опорная, скрытая.

Положение рычага в примере, приведенном на **рисунке 15**, определяют базы: технологическая, установочная, явная; технологическая, направляющая, скрытая; технологическая, опорная, скрытая.

Необходимо сделать следующее замечание по классификации технологических баз применительно к выполнению технологических операций.

Технологические базы можно классифицировать следующим образом:

Исходная база - это поверхность, линия или точка, относительно которой в операционной карте координируют положение обрабатываемой поверхности.

Установочная база - это поверхность, линия или точка, при установке по которой достигается определённое положение заготовки в направлении заданного (исходного) размера.

По своему характеру установочные базы бывают **опорные** и **проверочные**.

Опорные применяются при любой установке заготовок. При их использовании исключается необходимость выверки заготовки.

Проверочные базы необходимы в случае, когда заготовку необходимо установить в заданное положение с более высокой точностью. При использовании проверочных баз может осуществляться выверка (**рисунок 17**).

Исходные базы могут совпадать с установочными, причём это рекомендуется делать с точки зрения автоматического получения размеров. В ряде случаев установочной базой является сама обрабатываемая поверхность (бесцентровое шлифование, протягивание отверстий).

Вспомогательная база - это поверхность, специально обработанная или созданная для установки заготовки в процессе обработки. Эти поверхности могут на окончательно обработанной детали отсутствовать.

Примеры технологических баз

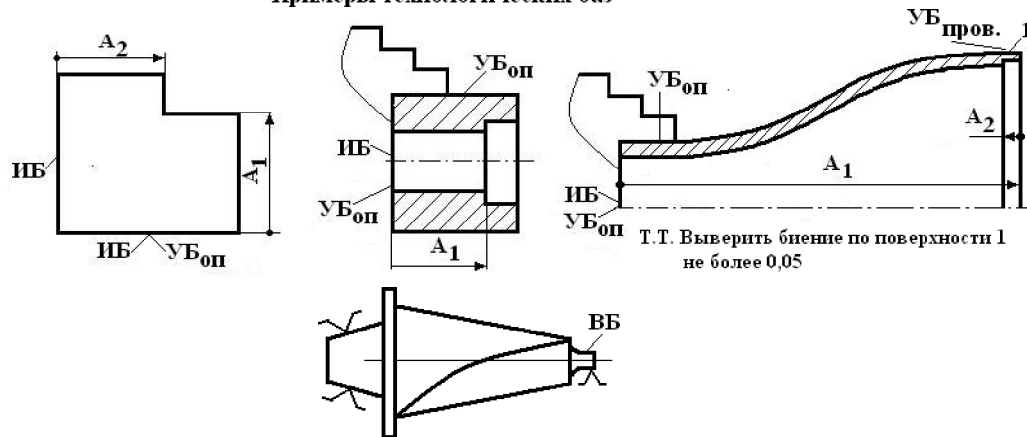


Рисунок 17 – Примеры технологических баз

3 Рекомендации к решению задач по базированию

Выбор технологических баз имеет цель наметить как сами базы, так и порядок их смены (если это необходимо). От правильности решения вопроса о технологических базах в значительной степени зависят точность взаимного расположения обрабатываемых поверхностей, точность размеров, степень сложности и конструкция приспособлений, производительность обработки.

Исходными данными для выбора баз являются: чертеж детали со всеми необходимыми требованиями, вид и точность заготовки, условие расположения и работы детали в машине.

Основные принципы, которыми необходимо руководствоваться при выборе технологических баз.

1. Принцип совмещения баз, когда в качестве технологических (**исходных**) баз принимают основные, т. е. конструкторские базы, используемые для определения положения детали в изделии. Это позволяет выдерживать размеры и технические требования **непосредственно** (с заданной по чертежу точностью). В случае несовпадения конструкторских и технологических баз возникают **погрешность базирования** и необходимость перерасчёта допусков, заданных конструктором в сторону их ужесточения. При этом рассматриваются и решаются технологические размерные цепи. **Погрешность базирования** равна сумме погрешностей размеров, соединяющих конструкторские и технологические базы.

Погрешность базирования рассчитывается для конкретных размеров. Она равна нулю в следующих случаях:

- при совмещении технологических баз с конструкторскими;
- для размеров, получаемых мерным инструментом (блоком инструментов);

- для диаметральных размеров;
- при работе методом пробных промеров и рабочих ходов.

Необходимо совмещать установочную и исходную базы (УБ = ИБ), что позволяет использовать способ автоматического получения размеров. При этом нужно стремиться к тому, чтобы выбранные установочные базы были **опорными**, т.к. использование проверочных баз требует дополнительных затрат времени на выверку и затрудняет автоматизацию процесса обработки.

2. Принцип постоянства базы, т.е. использовать на всех основных операциях одни и те же базы. Для выполнения этого принципа часто создают базы, не имеющие конструкторского назначения (например, центровые гнезда у валов и др.).

3. Форма и размеры установочных баз должны обеспечивать необходимую точность установки, устойчивость и минимальные деформации заготовки под действием сил закрепления и резания.

4. За установочные базы необходимо принимать такие поверхности, используя которые можно обработать наибольшее количество поверхностей, т.к. смена баз вызывает дополнительные погрешности.

5. В качестве черновых (установочных и исходных) баз следует выбирать поверхности, остающиеся необработанными и у готовой детали.

Если у детали обрабатываются **все поверхности**, то в качестве черновой базы следует выбирать поверхность, с **наиболее высокой точностью**. Не рекомендуются поверхности, имеющие следы разъёма штампов и т.п. Черновой базой можно пользоваться только один раз.

6. В качестве измерительных баз необходимо выбирать: на **окончательных операциях** - конструкторские базы, на **промежуточных операциях** - исходные.

В таблице 1 даны основные рекомендации о порядке выбора баз и решаемых при этом задачах, для выполнения технологических операций.

Таблица 1 - Основные рекомендации о порядке выбора баз и решаемые при этом задачи

Порядок выбора баз	Рекомендации по выбору баз	Задачи, решаемые правильным выбором баз
Выбор баз для завершающих операций технологического процесса	При анализе чертежа найти поверхность и элементы, относительно которых задано и наиболее строго лимитировано положение большинства других поверхностей и элементов. Как правило, именно эти поверхности и элементы, обозначенные на чертеже зачерненным треугольником и принимаются за базы.	Применение схемы установки, соответствующей положению детали в изделии в процессе эксплуатации, исключающей появление погрешности базирования и обеспечивающей выполнение конструкторских требований.
Выбор баз для первой операции	1. Поверхности, остающиеся необработанными (черные поверхности) и связанные размерами с обработанными поверхностями, принимаются как базы на первой операции. 2. Поверхности, принимаемые в качестве баз должны иметь достаточные размеры, более высокую степень точности и наименьшую	1. Обеспечивается правильное взаимное расположение системы обработанных поверхностей детали относительно необработанных. 2. Подготавливаются базы для дальнейших операций.

	шероховатость. 3. На поверхностях, принимаемых в качестве баз, не должны быть расположены прибыли, литники, швы. 4. Необработанные поверхности в качестве баз должны использоваться только один раз на первой операции.	3. Обеспечиваются возможно малые и равномерные припуски.
Выбор баз для промежуточных операций	Базы должны быть связаны с обрабатываемой поверхностью кратчайшей размерной цепью	Подготовка баз для заключительных операций

Материализация схемы базирования заключается в выборе типа опор, их количества и расположения относительно заготовки в соответствии со схемой базирования, разрабатываемой **технологом**.

При разработке схемы установки используются условные обозначения по ГОСТ 3.1107—81. «Графические обозначения опор, зажимов и установочных устройств».

Схема базирования является техническим заданием на проектирование установочного приспособления. При этом на операционном эскизе на поверхностях и элементах заготовки могут указываться как опорные точки, так и условные обозначения (**таблицы 2-5**).

На **рисунках 18 -24** приведены наиболее распространенные схемы базирования.

Таблица 2 - Условные обозначения опор

Опора	Обозначение опоры на видах		
	спереди	сверху	снизу
Неподвижная			
Подвижная			
Плавающая			
Регулируемая			

Таблица 3 - Условные обозначения опор

Оправки и патроны	Обозначение оправок и патронов
Оправка	
Трехкулачковый	
Поводковый	
Двухкулачковый	
Четырехкулачковый	

Таблица 4 - Условные обозначения центров

Центра	Обозначение центров
Неподвижный	
Вращающийся	
Плавающий	

Таблица 5 - Условные обозначения зажимов

Зажим	Обозначение зажима на видах		
	спереди	сверху	снизу
Одиночный			
Двойной			
Пневматические — Р Электрические — Е Электромагнитные — ЕМ		Гидравлические — Н Магнитные — М	

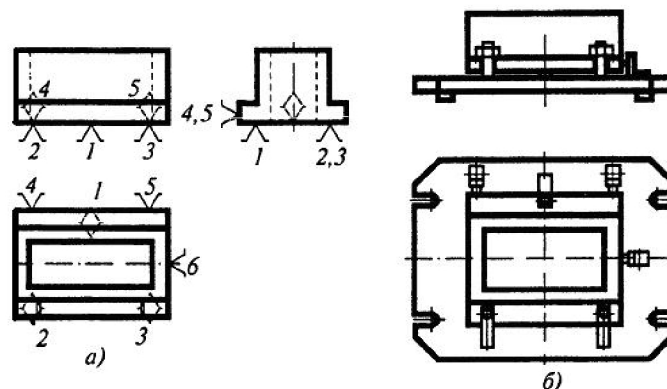


Рисунок 18 – Установка по плоскости основания и двум боковым сторонам
 а) теоретическая схема базирования, б) схема установки

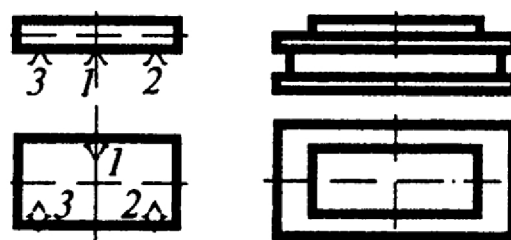


Рисунок 19 – Установка по плоскости (на магнитной плите)
 а) теоретическая схема базирования, б) схема установки

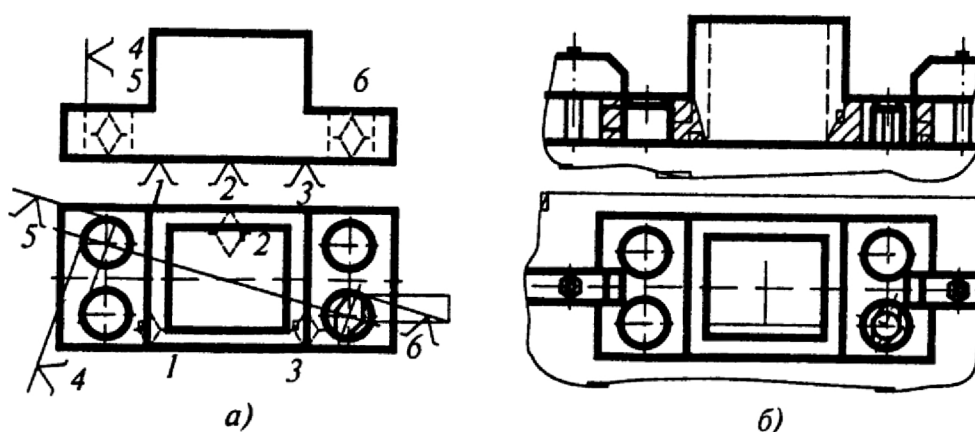


Рисунок 20 – Установка по плоскости и двум отверстиям
а) теоретическая схема базирования, б) схема установки

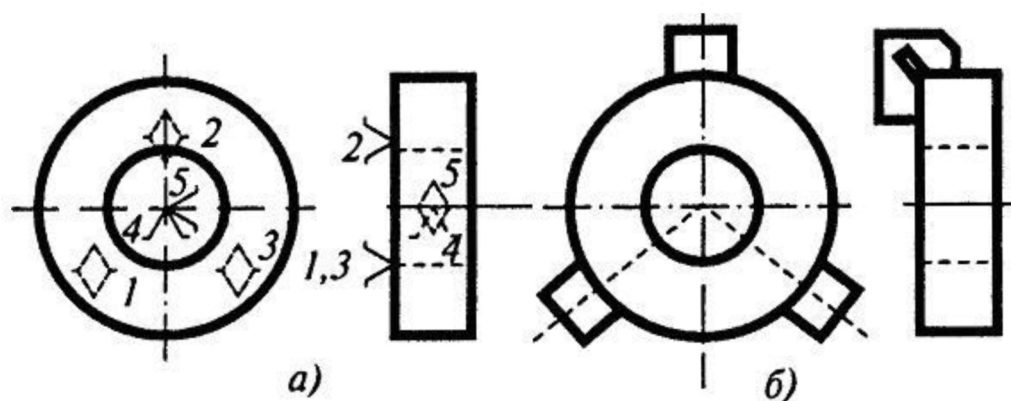


Рисунок 21 – Установка диска в трёхкулачковом патроне
а) теоретическая схема базирования, б) схема установки

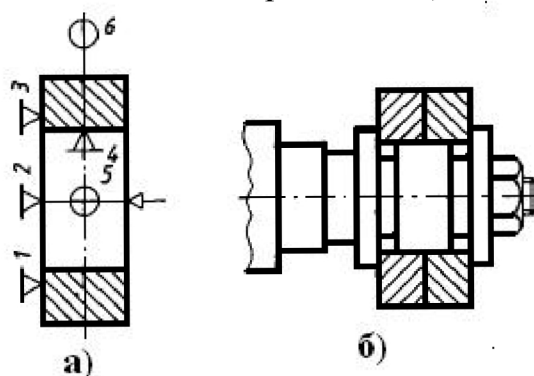


Рисунок 22 – Установка на жесткой консольной оправке
а) теоретическая схема базирования, б) схема установки

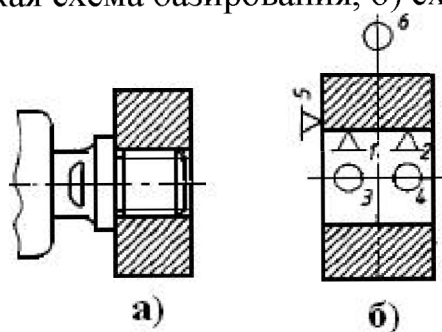


Рисунок 23 – Установка на жесткой резьбовой оправке
а) теоретическая схема базирования, б) схема установки

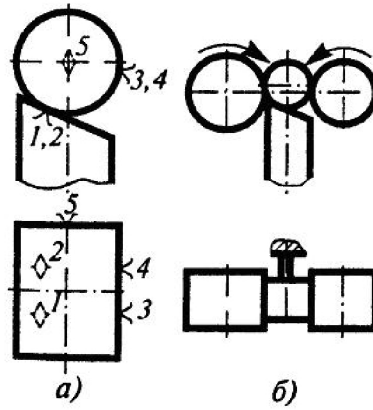


Рисунок 24 – Установка при бесцентровом врезном шлифовании
а) теоретическая схема базирования, б) схема установки

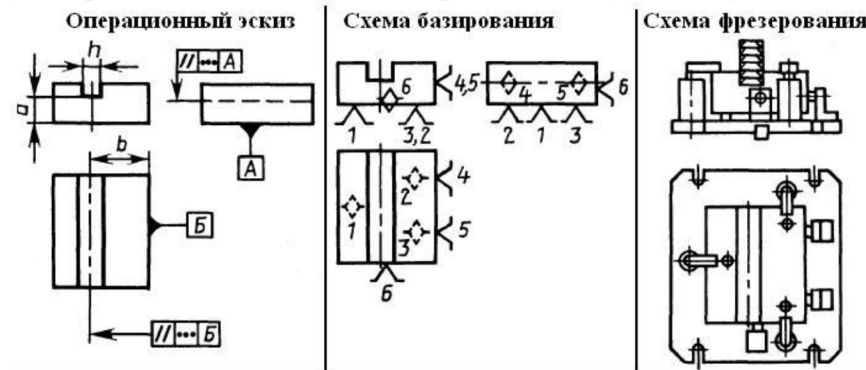


Рисунок 25 – Фрезерование паза

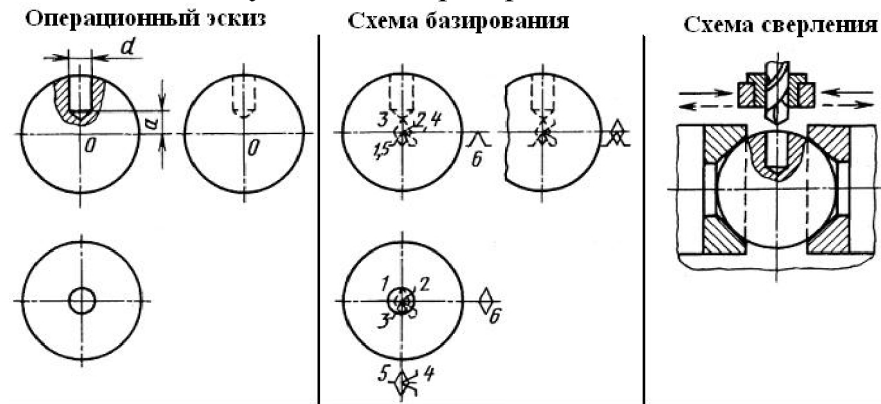


Рисунок 26 – Сверление отверстия

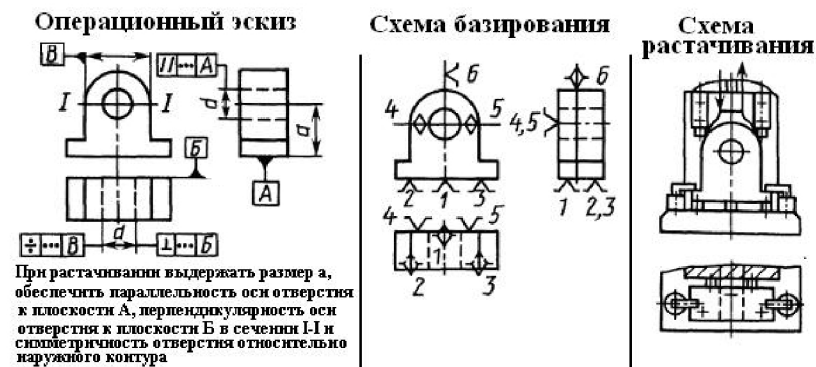


Рисунок 27 – Растачивание отверстия

ТЕМА 3: ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

1 Точность и погрешность. Категории и виды точности

Говоря о точности детали, мы имеем в виду точность, которая достигается при обработке, т.е. точность обработки.

Под **точностью обработки заготовки** понимают степень соответствия её параметров на каждой стадии обработки тем, что установлены в технологической документации на этих стадиях.

Под **точностью изготовления детали** понимают степень соответствия (приближения) фактически полученных в результате её изготовления параметров тем, что заданы в рабочем чертеже.

Под **точностью обработки поверхности** понимают степень её приближения к геометрическому прототипу.

Количественной мерой точности служит **погрешность обработки**, т.е. величина несоответствия между фактически полученными параметрами и заданными параметрами. Могут быть погрешности: формы, размеров поверхностей, координирующих размеров и соотношений.

Различают три категории точности:

1. Заданная (требуемая) точность - регламентируется допусками на соответствующий геометрический параметр, например $20_{-0,1}$.

2. Действительная (фактическая) точность - характеризуется погрешностью, которая выявляется при измерении уже обработанных деталей.

Если имеется одна деталь (единичное производство), то обычно, о её погрешности судят, сравнивая полученный размер, с одним из заданных значений (в большинстве случаев со средним значением размера). Например: $A_d = 19,97$ мм, $A_{ср.} = 19,95$ мм, тогда $\Delta = |A_d - A_{ср.}| = 0,02$ мм; в сравнении с номиналом $\Delta = |A_{ном.} - A_d| = 0,02$ мм.

В серийном производстве детали изготавливают партиями на станках, настроенных для данной операции. Погрешность здесь должна характеризовать точность обработки всей партии.

Особенность обработки на настроенных станках состоит в том, что результаты обработки проявляются в разбросе, рассеивании получаемых параметров (размеров, отклонений расположения), которые являются случайными величинами. Причинами рассеивания являются случайные погрешности, сопровождающие обработку. Их появление не подчиняется видимой закономерности и поэтому заранее не учитывается.

Законы рассеивания случайных величин изучает теория вероятности и математическая статистика.

Используя положения этих наук, можно определить величину **поля рассеивания** ω для бесконечно большого числа случаев и, т.о., охарактеризовать погрешность изготовления для партии деталей. Подчеркнем, что поле допуска, заданное в рабочем чертеже относится ко всем без исключения деталям, изготавливаемым по этому чертежу. Точно также обстоит дело и с полем рассеивания.

Поле рассеивания называется разность между максимальным $A_{д\max}$ и минимальным $A_{д\min}$ действительными размерами:

$$\omega = A_{д\max} - A_{д\min}.$$

Эта величина одна из характеристик точности действительного размера.

Условием обеспечения заданной точности является нахождение всех действительных предельных размеров, а, следовательно, и поля рассеяния, внутри заданных предельных размеров (т.е. внутри допуска) (**рисунок 1**).

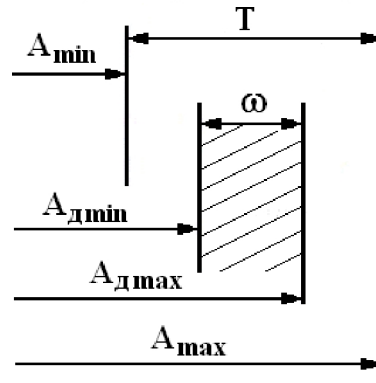


Рисунок 1 – Условие обеспечения точности

$\omega \leq T$ - условие обеспечения заданной точности.

Выдержать при обработке заготовки заданный размер означает сделать так, чтобы величина действительного размера оказалась внутри допустимых предельных значений.

3. Ожидаемая (расчётная) точность - точность, которую можно получить после обработки заготовки тем или иным методом (или можно ожидать). Эта точность определяется предположительно из опыта или расчёта.

Существуют следующие виды точности:

Достижимая точность - максимальная, физически достижимая точность для данного метода обработки без учёта затрат на её достижение.

Экономическая точность - точность, обеспечиваемая в нормальных условиях работы при использовании нормального оборудования, инструмента стандартного качества, соответствующей рабочей силы и затрат времени и средств, не превышающих затрат для других сопоставимых с рассматриваемым методом обработки.

В дальнейшем, говоря о точности обработки, мы будем иметь в виду только экономическую точность.

2 Виды совокупности деталей

В большинстве случаев понятие точности, допуска, погрешности связывают с определённой совокупностью детали. Например, требуемая по чертежу точность, заданная через допуск, относится **ко всем без исключения** деталям и узлам, которые будут изготавливаться по этому чертежу.

Надёжность и достоверность расчета величины ω зависит от количества деталей, выбранных для статистического анализа. Применительно к автоматическому получению размеров различают следующие **виды совокупностей деталей**:

1. **Партия** - детали, обработанные одним мерным инструментом при одной наладке станка до смены инструмента (например, вследствие притупления).

2. **Генеральная (складская) совокупность** - объединяет детали различных партий, обработанные на разных станках, при разных наладках и в разное время. Понятие заданная точность и ожидаемая относится к генеральной совокупности.

3. **Выборка** - детали, извлекаемые из партии или генеральной совокупности для статистического анализа точности обработки или статистического контроля точности. Выборка может быть малой (5...20 деталей) и большой (свыше 50 деталей).

Так как количество деталей в генеральной совокупности больше, чем количество деталей в партии и больше, чем количество деталей в выборке, т.е. $N_{\text{ген.}} > N_{\text{парт.}} > N_{\text{выб.}}$, то будет справедливо и неравенство:

$$T \geq \omega_{\text{ген.}} \geq \omega_{\text{парт.}} \geq \omega_{\text{выб.}}$$

Отметим, что знание величины $\omega_{\text{ген.}}$ позволяет оценить уже не точность конкретной операции, а точность данного метода обработки вообще.

3 Взаимосвязь между погрешностями геометрических параметров

Различают геометрические параметры: форма поверхности, размер, координирующий размер и соотношения размеров. Между погрешностями геометрических параметров существует определённая взаимосвязь.

Погрешность формы любой поверхности (цилиндрической, плоской и т.п.) влияет прямо, непосредственно как на точность размеров, так и на точность координирующих размеров (**рисунок 2**).

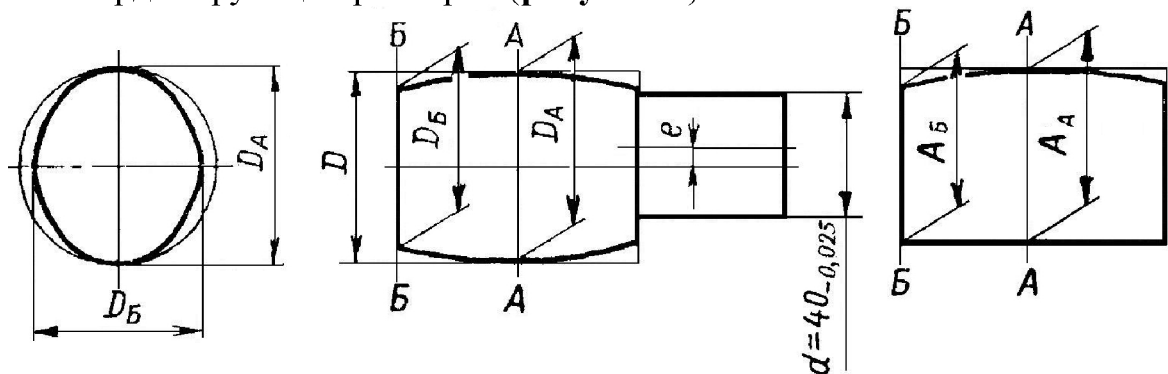


Рисунок 2 – Погрешности формы и соотношений

Погрешность формы $\omega_{\text{ф.}} = D_A - D_B$ и $\omega_{\text{ф.}} = A_A - A_B$ будет влиять на точность размера поверхности D и точность координирующего размера A . Для компенсации этой погрешности потребуется затратить часть допуска на соответствующий размер. Это обстоятельство приводит к тому, что в рабочих чертежах и в операционных картах допустимая погрешность формы оговаривается не всегда, а лишь в том случае, когда эта погрешность по служебному назначению детали должна быть меньше допуска на соответствующий размер. Например, конусность не более 0,01.

Рассмотрим взаимосвязь между погрешностями соотношений и точностью размера.

Несоосность (е) не оказывает влияния на точность размеров D и d , т.е. несоосность не может быть косвенно регламентирована через допуски на диаметральные размеры. Поэтому во всех случаях на рабочих чертежах и операционных картах необходимо проставлять допустимую величину несоосности (радиальное биение).

Непараллельность осей и плоскостей не влияет на точность диаметральных размеров, но непосредственно влияет на точность координирующих размеров.

Непараллельность осей (**рисунок 3**) не влияет на точность D_1 и D_2 , но оказывает прямое воздействие на размеры A_1 и A_2 . Т.е. непараллельность может быть косвенно регламентирована (ограниченна) через допуск на размеры A_1 и A_2 . Поэтому на рабочих чертежах и в операционных картах непараллельность оговаривается не всегда, а только в тех случаях, когда она, исходя из служебного назначения детали, должна быть меньше допуска (например, $A_1 = 30 \pm 0,02$, // более 0,04 оговаривать не надо, а если необходима // не более 0,04, то её необходимо оговорить в технических требованиях).

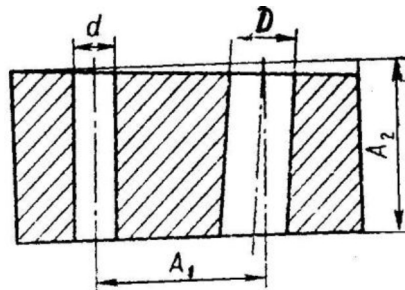


Рисунок 3 – Непараллельность осей и плоскостей

4 Структура (состав) погрешностей геометрического параметра

Для решения многих технологических задач необходимо знать, как образуются погрешности, из каких частей и элементов они состоят. Вопрос о структуре погрешностей неразрывно связан с классификацией причин, обуславливающих их появление. В общем случае геометрические параметры детали (форма, размеры, координирующие размеры и соотношения) могут выполняться **прямо** (непосредственно) и **косвенно** (через другие геометрические параметры).

Рисунок 4 – Схема формирования размеров при обработке детали

а) эскиз детали, б) технологический процесс, в) размерная схема

Заданные по чертежу размеры d , L_1 , и L_3 выдерживаются непосредственно, а размер L_2 - косвенно, т.е. за счёт выдерживания размеров A_1 и A_2 .

На схеме показана размерная цепь, в которой замыкающим звеном является размер A_{Δ} . Определим предельные размеры замыкающего звена:

$$A_{\Delta \max} = A_{1 \max} - A_{3 \min},$$

$$A_{\Delta \min} = A_{1 \min} - A_{3 \max}.$$

$$\omega_{\Delta} = A_{\Delta \max} - A_{\Delta \min} = (A_{1 \max} - A_{1 \min}) + (A_{3 \max} - A_{3 \min}) = \omega_1 + \omega_3.$$

В общем случае можно записать, что $\omega = \sum \omega_i$, т.е. погрешность размера при косвенном его выдерживании будет равна сумме операционных погрешностей. При непосредственном выдерживании размера его погрешность будет равна погрешности соответствующей операции (метода обработки).

Для повышения точности и снижения стоимости обработки необходимо стремиться к непосредственному выдерживанию заданных размеров.

Рассмотрим состав операционной погрешности.

Обрабатываемая поверхность у различных заготовок партии будет занимать относительно базы станка (приспособления) различные положения (**рисунок 5**). Это обусловлено воздействием многих факторов, связанных с методом обработки (деформация узлов станка, износ инструмента, температурная деформация и т.п.) и установкой и базированием заготовок (схема установки, шероховатость базовой поверхности, воздействие усилия закрепления и др.).

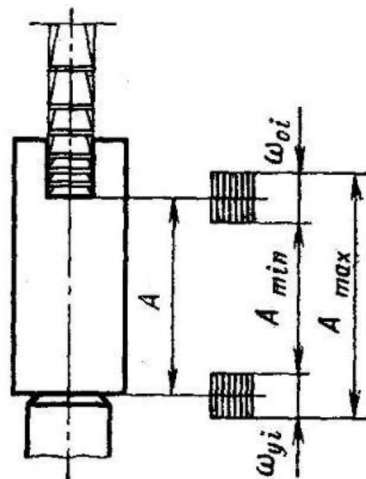


Рисунок 5 – Схема образования операционной погрешности

Операционная погрешность размера будет равна:

$$\omega_i = A_{3 \max} - A_{3 \min} = \omega_{oi} + \omega_{yi}$$

В общем случае можно записать:

$$\omega_i = \omega_{oi} + \omega_{yi},$$

где ω_{oi} - часть операционной погрешности, связанная с методом обработки; ω_{yi} - часть операционной погрешности, связанная с установкой и базированием заготовки (погрешность установки).

Для случая двухсторонней обработки, а также для внутриоперационных размеров $\omega_{yi} = 0$ и $\omega_i = \omega_{oi}$. Например, для размеров A_1 и A_3 погрешность равна $\omega_i = \omega_{oi} + \omega_{yi}$, а для размеров A_2 , D - $\omega_i = \omega_{oi}$ (рисунок 6).

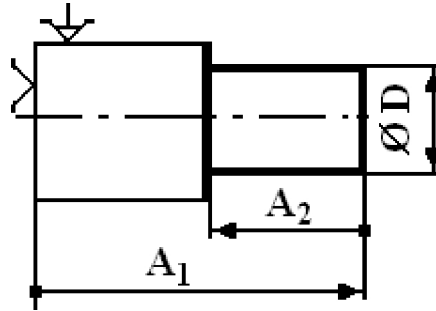


Рисунок 6 – Погрешности для разных случаев формирования размеров

В свою очередь, каждый их составляющих ω_{oi} и ω_{yi} представляет собой сумму первичных или частных погрешностей.

Первичной называют погрешность, обусловленную действием какого-либо одного производственного фактора (износ инструмента, температурные деформации, деформации технологической системы и т.п.). Классификацию можно представить в виде схемы представленной на (рисунке 7).

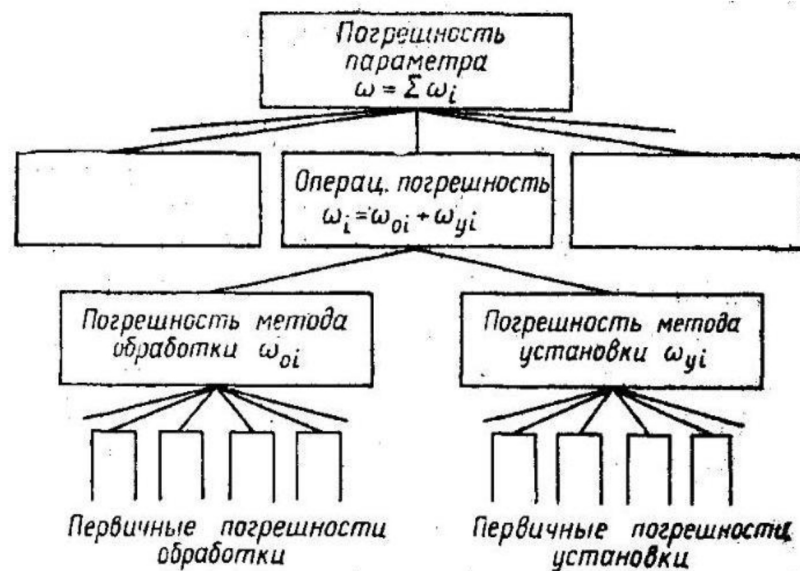


Рисунок 7 – Схема классификации погрешностей

5 Определение первичных погрешностей обработки

5.1 Классификация погрешностей

Определение первичных погрешностей выполняется с целью:

1. Получить качественные и количественные зависимости для оценки влияния основных производственных факторов на точность обработки.
2. Определить пути повышения точности.
3. Получить исходные данные для расчётного определения результирующей погрешности.

Каждая из первичных погрешностей может быть определена расчётно-аналитическим, либо опытно-статистическим путём. Наиболее достоверные результаты получаются при сочетании обоих этих методов.

В реальных условиях факторы, вызывающие появление погрешностей, действуют одновременно. Поэтому при установлении зависимости между отдельно взятым фактором и возникающей от него погрешности допускают, что в это время другие факторы не действуют.

Существует несколько классификационных признаков, определяющих первичные погрешности обработки:

1. Время формирования погрешностей (т.е. когда сформировалась). Несмотря на то, что погрешность проявляется непосредственно в процессе обработки, отдельные первичные погрешности могут закладываться на этапах, **предшествующих данной обработке**, а именно: а) проектирование операции; б) изготовление элементов технологической системы;

в) наладка технологической системы; г) непосредственная обработка.

2. Место формирования погрешностей (где формировались).



Каждый элемент технологической системы имеет свою погрешность.

3. Причина формирования погрешности.

3.1. Погрешности, вызванные действием силового фактора.

3.2. Погрешности, вызванные действием температурного фактора.

3.3. Погрешности, связанные с износом инструмента.

3.4. Погрешности, вызванные действием остаточных напряжений.

3.5. Кинематические погрешности, вызванные движением отдельных частей и элементов технологической системы.

3.6. Погрешности, связанные с действиями рабочего (оператора).

4. По характеру проявления во времени (как проявляется?) - постоянные (систематические), закономерно изменяющиеся и случайные погрешности.

5.2 Жёсткость и податливость технологической системы

Жёсткость технологической системы - способность этой системы оказывать сопротивление действующим на неё силам.

Жёсткость представляет собой отношение составляющей усилия резания направленной по нормали к обрабатываемой поверхности P_y , к смещению лезвия инструмента (y) в том же направлении:

$$j = P_y / y \text{ (Н/мм)}.$$

Смещение лезвия инструмента по оси Y оказывает непосредственное влияние на точность обработки (диаметр).

При расчётах погрешностей удобнее использовать величину, обратную жёсткости технологической системы и называемую - **податливость**.

Податливость - способность системы упруго деформироваться под действием внешних сил (сил резания):

$$w = 1/j = y / P_y \text{ (мкм/ Н)}.$$

Другими словами податливость это деформация системы под действием нагрузки в 1Н.

Технологическая система имеет податливость, состоящую из суммы податливостей отдельных её элементов - станка, приспособления, заготовки,

инструмента. В свою очередь, станок имеет податливость, состоящую из податливостей его отдельных элементов (передней и задней бабки, суппорта и др.).

Рассмотрим структуру перемещений системы для случая обработки вала на токарном станке, с установкой в центрах (рисунок 8).

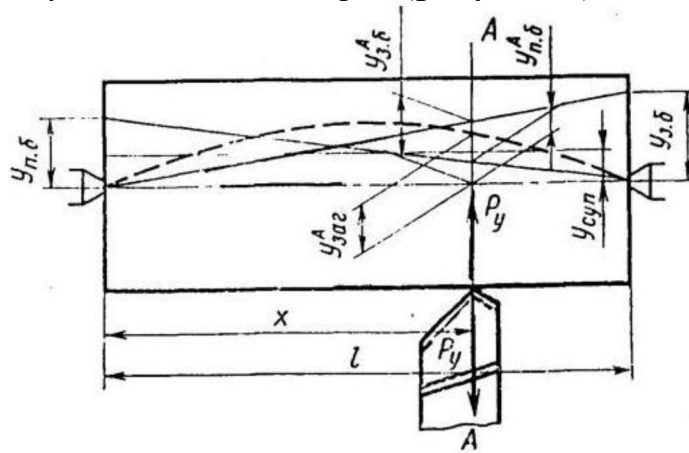


Рисунок 8 - Структура перемещений при закреплении вала в центрах

Суммарное перемещение лезвия инструмента в сечении А будет равно:

$$y^A = y_{п.б.}^A + y_{з.б.}^A + y_{суп.}^A + y_{заг}^A \quad (1)$$

Запишем перемещения с использованием податливостей.

Суммарное перемещение $y^A = P_y w_c$

$$y_{п.б.}^A = P_y w_{п.б.} \left(\frac{1-x}{l} \right)^2$$

Перемещение передней бабки

$$y_{з.б.}^A = P_y w_{з.б.} \left(\frac{x}{l} \right)^2$$

Перемещение задней бабки

Перемещение суппорта

$$y_{суп.}^A = P_y w_{суп.}$$

$$y_{заг}^A = \frac{P_y x^2 (1-x)^2}{3EI}$$

Деформация заготовки

Подставив в уравнение 1, получим суммарную податливость в сечении А:

$$w_c = w_{п.б.} \left(\frac{1-x}{l} \right)^2 + w_{з.б.} \left(\frac{x}{l} \right)^2 + w_{суп.} + \frac{x^2 (1-x)^2}{3EI} \quad (2)$$

Из этого уравнения видно, что податливость изменяется по длине заготовки: при $x=0$, $w_c = w_{п.б.} + w_{суп.}$, при $x=l$, $w_c = w_{з.б.} + w_{суп.}$.

Жёсткость (податливость) станка или его узлов определяется экспериментальным путём.

5.3 Погрешности, связанные с упругими деформациями технологической системы под действием сил резания

В результате деформации системы от сил резания изменяется расстояние между режущей кромкой инструмента и базовой линией (осью) заготовки (рисунок 9).

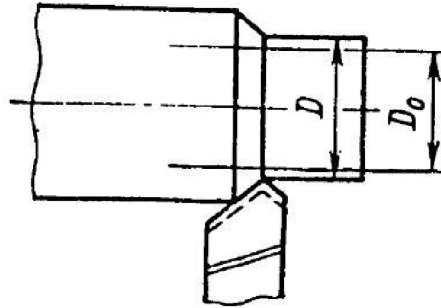


Рисунок 9 - Изменение размера заготовки в результате упругих деформаций системы

$$D = D_0 + 2y = D_0 + 2P_y w.$$

Если бы усилие резания и жёсткость были бы постоянны во всех сечениях и направлениях, а также при обработке партии заготовок, то величину y можно было бы заранее определить и скорректировать положение резца, установив его ближе к оси на эту величину. Однако, на практике, P_y и w изменяются, в результате чего появляются погрешности формы и размеров. Установить влияние P_y и w на точность одновременно не представляется возможным. Поэтому общий случай разделяют на два частных случая: 1. $P_y = \text{const}$, $w = \text{var}$; 2. $P_y = \text{var}$, $w = \text{const}$.

Рассмотрим 1 случай: $P_y = \text{const}$, $w = \text{var}$.

Для этого случая используем формулу 2 (см. выше). Можно показать, что в зависимости от соотношения значений податливостей, закон изменения погрешностей формы заготовки, будет различным.

1. Если $w_B > w_A$, $w_B > w_A$, т.е. деталь жёсткая, а станок имеет малую жёсткость, то возникает погрешность формы - **корсетность** (седлообразность).

2. Если $w_B < w_A$, $w_B < w_A$, т.е. деталь не жёсткая, а станок имеет высокую жёсткость, то возникает погрешность формы - **бочкообразность** (рисунок 10).

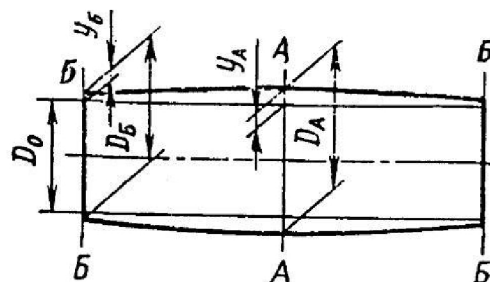


Рисунок 10 –Погрешность формы при изменении жёсткости системы по длине заготовки

Погрешность формы равна $\omega_{\text{ф.}} = D_A - D_B$.

Но $D_A = D_0 + 2y_A$, а $D_B = D_0 + 2y_B$, отсюда $\omega_{\phi} = 2(y_A - y_B)$, или с учётом, что $y_A = P_y w_A$, $y_B = P_y w_B$, $\omega_{\phi} = 2P_y(w_A - w_B)$.

Рассмотрим 2 случай: $P_y = \text{var}$, $w = \text{const}$.

Основными причинами изменения силы резания являются: изменение глубины резания; изменение механических свойств материала; притупление инструмента и изменение его геометрии.

Пусть заготовка имеет погрешность формы - овальность (рисунок 11).

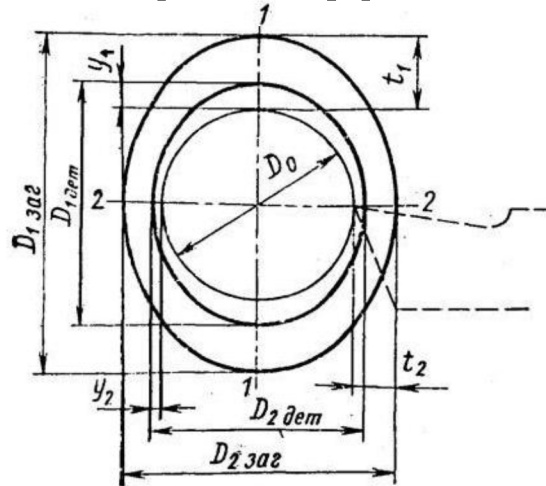


Рисунок 11- Схема образования погрешности формы детали в результате деформации системы под влиянием усилий резания

При отсутствии упругих деформаций после обработки, деталь бы имела размер D_0 . Однако изменение усилия резания вызовет отжатие инструмента, причём, это оно будет иметь различные значения в разных точках по окружности.

Из схем видно, что глубина резания t непрерывно меняется от максимального значения t_1 в сечении 1-1 до минимального t_2 в сечении 2-2. Также будет меняться составляющая силы резания P_y от $P_{1y \max}$ до $P_{2y \min}$.

Сечение 1	Сечение 2
t_1	t_2
$P_{y1} = \chi_{FZ} t_1 S^{0.75}$	$P_{y2} = \chi_{FZ} t_2 S^{0.75}$
$y_1 = P_{y1} w$	$y_2 = P_{y2} w$
$D_{1\text{дет.}} = D_0 + 2y_1$	$D_{2\text{дет.}} = D_0 + 2y_2$

Погрешность формы $\omega_{\text{дет.}} = D_1 - D_2 = 2(y_1 - y_2)$, или $\omega_{\text{дет.}} = \chi_{FZ} S^{0.75} w (t_1 - t_2)$.

Но $2(t_1 - t_2) = D_{1\text{заг.}} - D_{2\text{заг.}} = \omega_{\text{заг.}}$, тогда $\omega_{\text{дет.}} = \chi_{FZ} S^{0.75} w \omega_{\text{заг.}}$, или иначе

$$\omega_{\text{дет.}} = \frac{\chi_{FZ} S^{0.75} w}{j} \omega_{\text{заг.}} - \text{формула копирования.}$$

Эта формула показывает, что погрешность заготовки копируется на обрабатываемую деталь, но в уменьшенном размере. Если заготовка имела правильную геометрическую форму, но была установлена при обработке со смещением оси (биением), то и деталь после обработки будет иметь погрешность - биение.

Пример. На токарном станке обрабатывается партия заготовок $D=50^{+2.0}_{-1.0}$. Материал – сталь, $C_{pz}=1960$ МПа (200 кгс/мм²), $\lambda=0,4$, $s=0,5$ мм/об. Требуется определить погрешность размеров деталей после обточки, связанное с упругой деформацией системы под действием сил резания. $j=15000$ Н/мм ($w=0,066$ мкм/Н). При $D=50^{+2.0}_{-1.0}$ – погрешность заготовки – $\omega_{заг}=3,0$ мм. Используя формулу копирования, получаем $\omega_{дет}=0,4 \cdot 1960 \cdot 0,5^{0.75} \cdot 0,066 \cdot 3 = 96$ мкм.

Формула копирования позволяет:

1. Решать задачи повышения точности обработки. Её структура показывает, какие производственные факторы необходимо изменять и в каком направлении, чтобы достигнуть заданной точности или повысить точность.
2. Определять подачу, обеспечивающую обработку с заданным допуском.

$$\omega_{дет.}=T_{дет.}, \omega_{заг.}=T_{заг.}, \text{ тогда } T_{дет.}=\lambda C_{pz} S^{\frac{1}{2}} w T_{заг.}, \text{ где } T_{дет.}=\sqrt{\frac{T_{дек}}{\lambda C_{pz} w_{заг.}}}$$

где κ - коэффициент, показывающий, какую часть допуска можно выделить для компенсации погрешностей, возникающих в результате деформаций (для сталей $\kappa \leq 0,5$).

3. Определять жёсткость технологической системы путём обтачивания ступенчатых или эксцентричных валиков.

Перед обработкой измеряются диаметры заготовки (рисунк 12) и определяются погрешности формы: $\omega_{заг.}=D_{1заг.}-D_{2заг.}$.

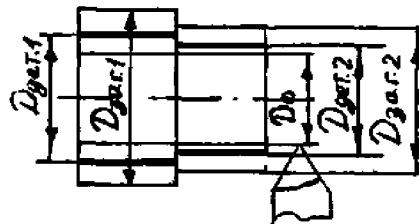


Рисунок 12 – Ступенчатый валик

Станок настраивается на диаметр D_0 и производится обработка валика. Затем определяем погрешность формы детали $\omega_{дет.}=D_{1дет.}-D_{2дет.}$. Используя формулу копирования, получим

$$w = \frac{\omega_{дет.}}{\lambda C_{pz} S^{\frac{1}{2}} \omega_{заг.}}$$

5.4 Погрешности обработки, обусловленные деформацией заготовки под действием сил закрепления

Если расточить отверстие втулки в деформированном состоянии, оно будет круглым при зажатом положении (рисунк 13, а). Но если заготовку после обработки снять со станка, обработанное отверстие будет иметь погрешность формы – гранёность. (рисунк 13, б).

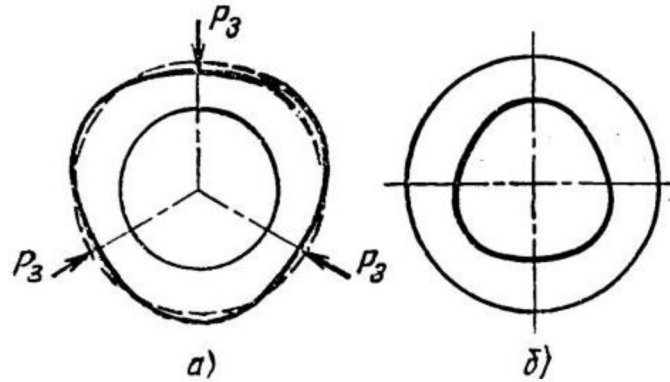


Рисунок 13 – Погрешность формы заготовки в результате деформации от сил закрепления

Эта погрешность определяется разностью наибольшего и наименьшего радиусов и подсчитывается по формуле

$$\Delta = \frac{0.242 P_3 (k + 1)^3}{Eb(k - 1)^3}$$

где P_3 – усилие зажима; b – длина втулки; $k = D_n/D_v$ – отношение наружного диаметра втулки к внутреннему. При закреплении заготовок в двухкулачковых патронах их деформации и погрешности формы будут больше, чем при закреплении в трехкулачковом патроне. При закреплении в патроне с четырьмя и большим числом кулачков деформация заготовок и погрешности формы будут значительно меньше.

5.5 Определение погрешностей, связанных с упругими деформациями системы под влиянием нагрева

В процессе обработки заготовок элементы системы – станок, заготовка, инструмент, приспособление – находятся под непрерывным воздействием различных тепловых источников. Нагревание элементов системы ведет к их температурным деформациям и к возникновению погрешностей обработки. Эти погрешности можно разделить на следующие группы:

а) Погрешности от температурных деформаций станка

При работе станков в наибольшей степени нагреваются шпиндельные бабки: температура в различных точках бабки повышается от 10 до 50°C. Нагрев узлов станка обуславливает изменение их взаимного расположения. С точки зрения точности обработки необходимо учитывать перемещение передней и задней бабок и суппорта относительно станины в направлении нормали к обрабатываемой поверхности: для токарных станков, например, в горизонтальной плоскости. Температурные деформации узлов станка невелики – 8–12 мкм (**рисунок 14**). Для предупреждения появления погрешностей от температурных деформаций станков при точных работах производят их предварительный прогрев обкаткой вхолостую в течение 2-3 ч. Последующие перерывы в работе должны быть не продолжительными с тем, чтобы станок не потерял «рабочую форму».



Рисунок 14 – Температурные деформации станка

б) Погрешности обработки, возникающие в результате температурных деформаций инструмента.

Теплота, выделяющаяся при резании металлов, нагревает инструмент, что приводит к его удлинению. Удлинение происходит в течение 8-16 минут непрерывного резания, а затем наступает тепловое равновесие (**рисунок 15**). Например, при обработке твердосплавным резцом без охлаждения его деформация достигает 30-50 мкм (с охлаждением в 3-3,5 раза меньше).

Удлинение увеличивается с ростом подачи, глубины и скорости резания.

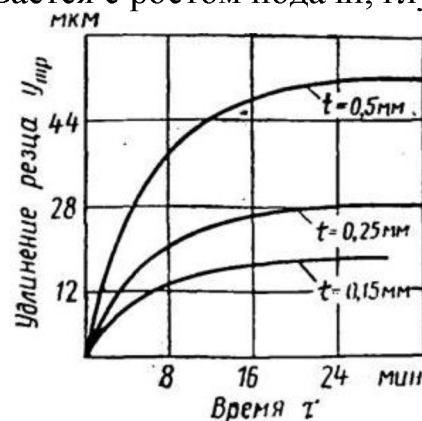


Рисунок 15 - Температурные деформации резца

В общем случае удлинение резца может быть определено по следующей формуле:

$$u_p = \frac{L_p}{E} \cdot \sigma_v \cdot \frac{F}{A}$$

где L_p - вылет резца; σ_v - предел прочности резца; F – площадь.

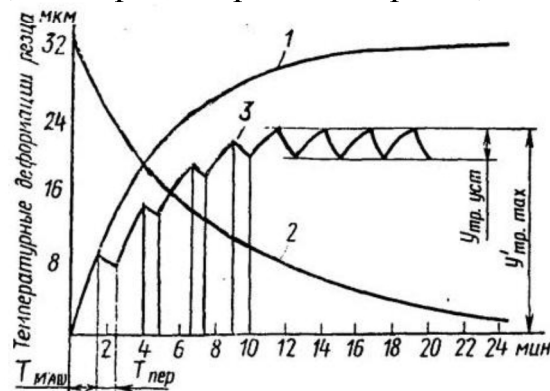


Рисунок 16 - Температурные деформации резца при точении с перерывами

Характер влияния температурных деформаций инструмента на точность зависит от соотношения времени резания и времени перерыва, габаритов инструмента и порядкового номера заготовки с начала обработки (**рисунок 6**).
Общая погрешность формы от температуры: $\omega_{\phi} = 2u_{\text{т.р.мах}}$

Для уменьшения влияния температурных деформаций инструмента необходимо вести настройку станка на заданный размер и последовательную обработку заготовок в состоянии теплового равновесия- $\omega_{\phi} = 2u_{\text{т.р.уст.}}$

в) Погрешности обработки, возникающие в результате температурных деформаций заготовки

При обработке резанием более 10% выделяемой теплоты переходит в заготовку, вызывая её нагрев и деформацию. Необходимо различать **неравномерный** и **равномерный** нагрев. При **равномерном** нагреве возникает погрешность размеров, а при **неравномерном** - погрешность формы.

Температурные деформации особенно значительны при обработке тонкостенных, ажурных заготовок.

Температурные деформации увеличиваются с увеличением глубины резания и уменьшаются с увеличением подачи и скорости.

5.6 Погрешности, возникающие в результате размерного износа инструмента

Износ инструмента, измеряемый по нормали к обрабатываемой поверхности и непосредственно влияющий на точность, принято называть **размерным**. Применительно к обтачиванию резцами размерный износ – радиальный износ.

Размерный износ обозначают **и**, измеряют в мкм и выражают в зависимости от пути резания **L**, который для токарной обработки определяется по формуле:

$$L_{\text{рез}} = \frac{\pi D_{\text{заг}} L_{\text{заг}}}{108 S}$$

где $D_{\text{заг}}$ - диаметр заготовки; $L_{\text{заг}}$ - длина заготовки; S - подача.

Износ инструмента условно можно разделить на **три этапа (рисунок17)**:
I – начальный износ, II – нормальный износ и III – интенсивный износ, когда нужно прекращать резание во избежание разрушения режущей кромки резца.

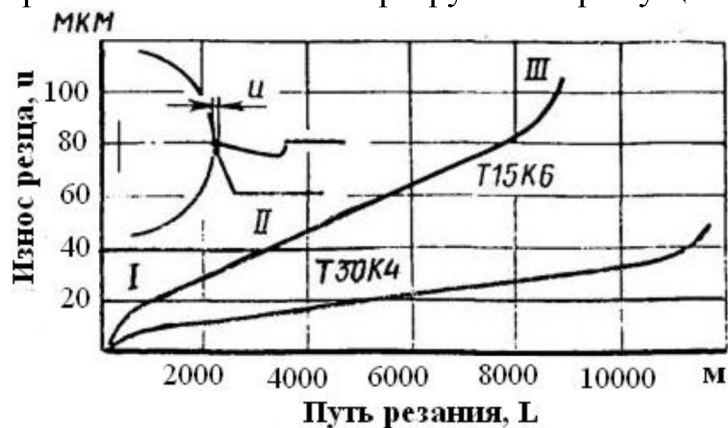


Рисунок 17 – График размерного износа

Путь резания для начального износа составляет 500–1000 м, для участка нормального износа – 30000 – 40000 м (для резцов Т30К4). На участке нормального износа зависимость $u=f(L)$ носит линейный характер. Это дает основание характеризовать интенсивность износа величиной относительного или удельного износа u_0 в мкм/км.

Удельный износ - это размерный износ на 1000 метров пути резания:

$$u_0 = \frac{u}{L} 1000, \text{ мкм,}$$

где u - действительный износ.

Значение u_0 зависит от материала обрабатываемой заготовки, режимов резания, марки материала режущего инструмента и других факторов. Например: при обработке легированной стали на скорости 135 м/мин резцами Т15К6 $u_0=8,5$ мкм/км; при обработке алюминиевых сплавов на скорости 180–200 м/мин резцами ВК8 $u_0=2,0$ мкм/км, алмазными резцами при скорости до 1000 м/мин $u_0=0,0005–0,001$ мкм/км.

В результате размерного износа расстояние между вершиной резца и осью вращения увеличивается (уменьшается для отверстия) на величину u_i

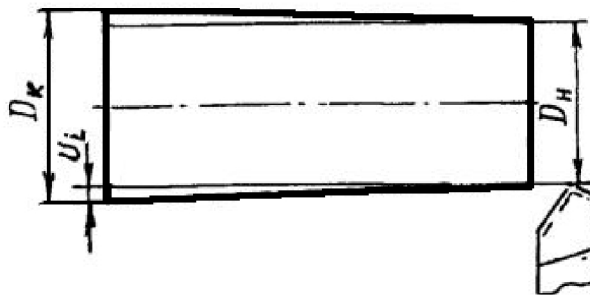


Рисунок 18 – Схема образования погрешности формы

Износ в мкм за время обработки одной заготовки

$$u_i = \frac{u_0 L}{1000}$$

Непосредственным результатом влияния размерного износа будет появление погрешности формы (для случая токарной обработки – конусности (**рисунок 18**): $\omega_f = D_k - D_n = 2 u_i$

Если заданный размер выполняется методом пробных промеров и проходов, то износ инструмента компенсируется за счёт настройки инструмента на каждую новую заготовку. При работе **по настройке** износ и, соответственно, погрешность будут накапливаться от одной заготовки к другой до поднастройки инструмента. Необходимо отметить, что по мере износа и, соответственно, затупления инструмента значительно возрастают силы резания что приводит к дополнительным деформациям технологической системы.

5.7 Погрешности, вызванные внутренними остаточными напряжениями

Остаточные напряжения - это напряжения, которые существуют в материале детали при отсутствии воздействия на неё внешних сил.

Эти напряжения возникают в процессе предшествующей обработки и остаются в детали после её окончания. Остаточные напряжения полностью уравновешены и их действие на деталь с внешней стороны ничем не проявляется. Остаточные напряжения (по предположению академика Давиденкова Н.Н.) разделяются на три вида:

1. **Напряжения 1-го рода - макронапряжения** (внутренние) - распространяются по всему сечению детали.
2. **Напряжения 2-го рода - микронапряжения** - действуют в пределах одного кристалла или группы кристаллических зёрен.
3. **Напряжения 3-го рода - субмикроскопические** - относятся к искажению кристаллической решётки.

При обработке заготовок основное влияние на точность внутренние напряжения (1-го рода). В зависимости от способа обработки они могут распространяться как по всему сечению, так и концентрироваться в поверхностном слое заготовки.

Внутренние напряжения возникают из-за неоднородных объёмных изменений металла в результате действия следующих факторов:

1. Неоднородного (неравномерного) нагрева или охлаждения.
2. Фазовых и структурных превращений при пластической деформации (ковка, штамповка и т.п.)
3. В результате неоднородного протекания фазовых превращений при получении заготовок (например, отливкой).

В большинстве случаев остаточные напряжения возникают в условиях одновременного действия различных факторов: механических, тепловых и физико-химических.

Механизм возникновения погрешностей вследствие остаточных напряжений состоит в том, что при удалении припуска или при термической обработке без снятия припуска нарушается равновесие внутренних напряжений. В результате деталь начинает деформироваться до тех пор, пока перегруппировка напряжений не приведёт к равновесному состоянию.

Снятие или уменьшение внутренних остаточных напряжений в заготовках достигается естественным старением, термообработкой (искусственным старением) и некоторыми методами механического воздействия.

Естественное старение - это "выдерживание" заготовки на воздухе в течение определённого срока (от 3 до 6 месяцев). Его проводят после предварительной обработки.

Искусственное старение - это медленный нагрев до 500°C - 600°C , выдержка в течение 5-6 часов и более, и последующее медленное охлаждение.

5.8 Погрешности, связанные с неточностью мерного и профильного инструмента

К **мерному** инструменту относят свёрла, зенкеры, развёртки, протяжки, шпоночные резцы, фрезы и другие. Погрешность этих инструментов полностью копируется на деталях. Это приводит к появлению систематических и постоянных (в пределах одной партии заготовок) погрешностей.

Профильный инструмент - резьбовые резцы и фрезы, зубонарезные инструменты (фрезы, долбяки), шлифовальные круги. Погрешность профиля копируется на деталь.

5.9 Кинематические погрешности

Эти погрешности возникают при замене точной кинематической схемы обработки приближённой схемой. Кинематическая погрешность будет зависеть от точности подбора зубчатых колёс, обеспечивающих заданное движение инструмента относительно заготовки.

Например, необходимо нарезать модульную резьбу (червяк) $m=2,5$ мм на токарном станке, шаг ходового винта которого составляет $t_v = 6,0$ мм. Передаточное отношение в цепи подачи

$$i = \frac{t_P}{t_v} = \frac{\pi m}{t_v} = \frac{\pi 2,5}{6} = \frac{5}{12} \pi,$$

где π – число иррациональное. Заменяем его простой дробью $\pi = \frac{22}{7}$ и тогда

$i = \frac{5}{12} \frac{22}{7}$. При настройке цепи подачи по такому передаточному отношению нарезанный винт будет иметь погрешность шага 0,04%.

5.10 Погрешности, связанные с геометрической неточностью станков

Каждый станок изготавливается с определённой степенью геометрической точности, которая определяется в ненагруженном состоянии.

Неточности во взаимном расположении узлов станка (непараллельность, неперпендикулярность, биение) переносятся в ходе операции на обрабатываемую поверхность. Так, на токарном станке неперпендикулярность направляющих суппорта к оси вращения шпинделя приводит к появлению неплоскостности (конусности) номинально плоской поверхности торца к оси заготовки.

Смещение заднего центра относительно оси переднего в горизонтальной плоскости – к появлению конуса вместо цилиндра (**рисунок 19, а**), а то же смещение в вертикальной плоскости – к образованию гиперboloида вместо цилиндра (**рисунок 19, б**).

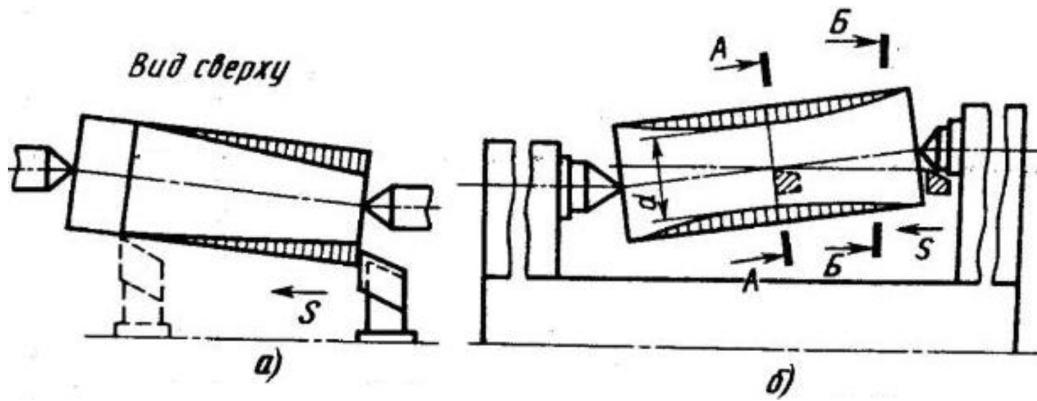


Рисунок 19 – Погрешности при смещении заднего и переднего центров

На вертикально-фрезерном станке при обработке плоскости перпендикулярность оси шпинделя с фрезой к направлению продольной подачи стола возникает вогнутость – погрешность формы, а при наличии неперпендикулярности стола станка к оси шпинделя образуется непараллельность обработанной поверхности с базовой плоскостью.

На станках с ЧПУ, хотя они и отличаются особо высокой точностью, все же имеют место ошибки программы, положения инструментов, исполнения программы системами станка, погрешности позиционирования.

5.11 Погрешности настройки станков

Настройка – это процесс первоначального установления требуемой точности размера за счет точности относительного расположения рабочей поверхности инструментов, станка, приспособления.

В практике используют в основном настройку методом проходов с промерами с обработкой пробных заготовок или настройку инструментов по эталонной детали – эталону в статическом состоянии.

Метод **пробных проходов** гарантирует большую точность настройки, т.к. позволяет частично учесть, например, податливость ТС. Погрешность настройки по этому методу будет:

$$\omega_{\text{н}} = \sqrt{\omega_{\text{рег}}^2 + \omega_{\text{изм}}^2}$$

где $\omega_{\text{рег}}$ – погрешность регулирования положения резца;

$\omega_{\text{изм}}$ – погрешность измерения.

При настройке по эталону погрешность составит

$$\omega_{\text{н}} = \sqrt{\omega_{\text{из}}^2 + \omega_{\text{уи}}^2}$$

где $\omega_{\text{из}}$ – погрешность изготовления эталона;

$\omega_{\text{уи}}$ – погрешность установки инструмента.

Метод **динамической настройки** основан на пробных проходах с определением ожидаемого поля рассеивания размеров в партии. Этот метод рационален, но трудоёмок, из-за чего ограничен в использовании.

6 Определение первичных погрешностей установки

При обработке **погрешность установки** можно определить как погрешность установки инструмента, погрешность установки приспособления и погрешность установки заготовки.

Первая погрешность является постоянной, действуют в течение обработки всей партии заготовок, и может быть частично компенсирована при настройке станка. **Погрешность установки приспособления** в условиях массового производства также может быть компенсирована при настройке. В условиях серийного производства, когда происходит смена приспособлений эта погрешность можно рассматривать как случайную величину. **Погрешность установки заготовки** будет изменяться в пределах всей обрабатываемой партии заготовок. Она носит случайный характер и поэтому, как правило, является определяющей, оказывающей основное влияние на точность размера.

Под погрешностью установки заготовки понимают отклонение фактически достигнутого положения заготовки или изделия при установке от требуемого.

В общем случае структура погрешности установки может быть определена как:

$$\omega_y = \omega_{y.z.} + \omega_{пр.} + \omega_{б.}$$

где $\omega_{y.z.}$ - погрешность установки заготовки;

$\omega_{пр.}$ - погрешность установки приспособления;

$\omega_{б.}$ - погрешность от не совмещения баз.

В реальных условиях обработки одновременно действует много факторов, приводящих к появлению первичных погрешностей установки:

- упругие и пластические деформации установочной поверхности заготовки под действием сил закрепления и сил резания;
- геометрические и динамические погрешности приспособлений;
- система простановки операционного размера;
- схема установки;
- погрешности формы и размеров базирующей поверхности;
- несовмещение исходной и установочной баз.

6.1 Первичные погрешности установки, обусловленные упругими и пластическими деформациями установочной поверхности заготовки под влиянием сил резания и закрепления

При закреплении заготовки, под действием сил закрепления Q , а затем и сил резания P_y , микронеровности, имеющиеся на базовой поверхности, будут деформироваться (**рисунок 20**). В результате, установочная поверхность будет смещаться от заданного положения на некоторую величину y . Эта величина будет зависеть от действующих сил, шероховатости поверхности, механических свойств материала и т.п. При обработке партии заготовок эта величина будет изменяться от y_{min} до y_{max} . Тогда первичная погрешность установки заготовки: $\omega_{y.z.} = y_{max} - y_{min}$.

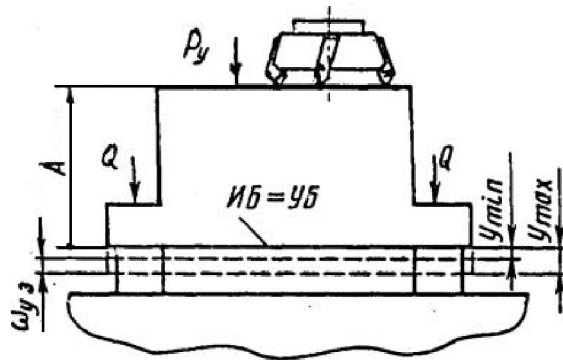


Рисунок 20 – Схема образования $\omega_{у.з.}$ за счёт деформации опорной поверхности

Её величина для разных условий обработки составляет:

- при чистовой базе $\omega_{у.з.}=0,002...0,005\text{мм}$;
- при черновой базе до $0,05\text{ мм}$.

6.2 Первичные погрешности установки, возникающие из-за геометрической и динамической неточности приспособлений

Рассмотрим установку заготовки в тисках (**рисунок 21**). Сила зажима, возникающая при вращении винта (или от пневмопривода), образует с силами реакции, действующими от заготовки на губки тисок, пары сил, поворачивающие (в пределах зазоров и упругих деформаций) и приподнимающие губки тисок.

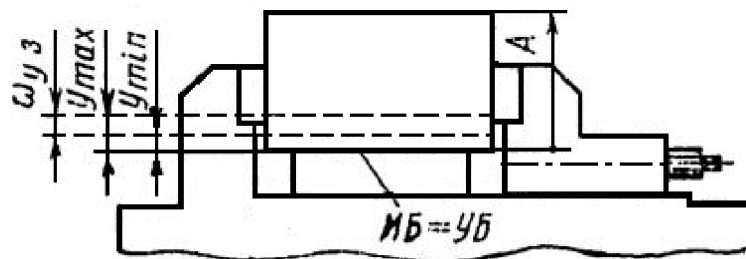


Рисунок 21 - Образование погрешности установки в результате деформации приспособления от силы зажима

Вместе с ними в процессе зажима приподнимается и заготовка. При этом теряется контакт нижней плоскости с установочными элементами приспособления (прокладками) – плоскость, являющаяся исходной базой, перемещается вверх на величину y . Условия закрепления деталей не остаются постоянными, поэтому в пределах партии заготовок значение y будет колебаться от $y_{\min}$ до $y_{\max}$. Это приводит к появлению погрешностей установки заготовки в приспособлении: $\omega_{у.з.} = y_{\max} - y_{\min}$.

По данным экспериментальных исследований, величина $\omega_{у.з.}$ зависит от типоразмера приспособлений, их состояния (новые, старые), постоянства силы зажима и других факторов и составляет от $0,01...0,02\text{ мм}$ (для малоизношенных и малогабаритных) до $0,10...0,15\text{ мм}$ (для старых тисок и крупных заготовок).

6.3 Первичные погрешности установки, обусловленные неточностью формы и размеров базирующей поверхности

На **рисунке 22** приведён операционный эскиз шлифования наружной цилиндрической поверхности втулки с установкой её по отверстию на оправке с зазором.

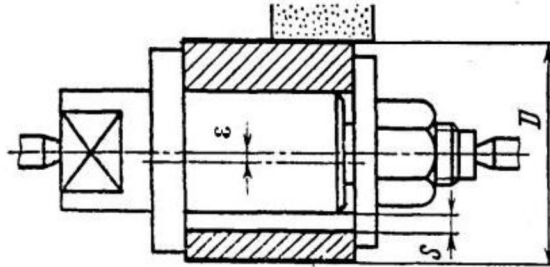


Рисунок 22 - Образование погрешности установки за счёт зазора

Возможная максимальная величина зазора:

$$S_{\max} = S_{\min} + T_{\text{пр.}} + T_D,$$

где $S_{\min}$ - минимальный зазор, гарантирующий возможность одевания втулки на оправку; $T_{\text{пр.}}$ - допуск на размер оправки; T_D - допуск на размер базирующей поверхности заготовки (на размер отверстия). При некоторых условиях (например, при закреплении в горизонтальном положении) возможно смещение оси исходной базы- отверстия относительно оси установочного элемента приспособления- оправки на величину $\varepsilon = S_{\max} / 2$. Полное же поле погрешности установки будет равно:

$$\omega_{y.z} = 2\varepsilon = S_{\min} + T_{\text{пр.}} + T_D,$$

Если цилиндрическая заготовка имеет погрешность формы- **овальность** $\omega_{\phi} = D_{\max} - D_{\min}$, то при установке её в трехкулачковом патроне возникает смещение оси, максимальное значение которого достигает $\varepsilon = 0,25 \omega_{\phi}$. Полное поле погрешности установки, обусловленное этим фактором, будет равно:

$$\omega_{y.z} = 2\varepsilon = 0,5 \omega_{\phi}.$$

6.4 Первичные погрешности установки, обусловленные системой простановки операционных размеров

Погрешность установки существенным образом зависит от схемы простановки размеров. Например, необходимо фрезеровать лыску на валике (**рисунк 23**). При этом возможны 3 способа простановки операционных размеров.

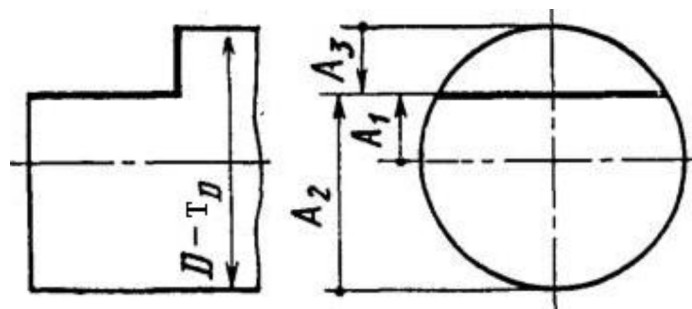


Рисунок 23 – Схема простановки размеров при фрезеровании

Погрешность установки для трёх способов простановки операционных размеров будут различны, что связано с несовпадением измерительной и установочной базы.

Для анализа примем одну из возможных схем установки на призме с углом при вершине α . На **рисунке 24** приведена расчётная схема, на которой показаны два контура с предельно допустимыми значениями диаметра D . Для **первого варианта**, когда за исходную базу принята ось валика, искомая величина будет $\omega_{y.3} = O_1O_2$.

$$\omega_{y.3} = O_1O_2 = \frac{T_D}{2 \sin \frac{\alpha}{2}}.$$

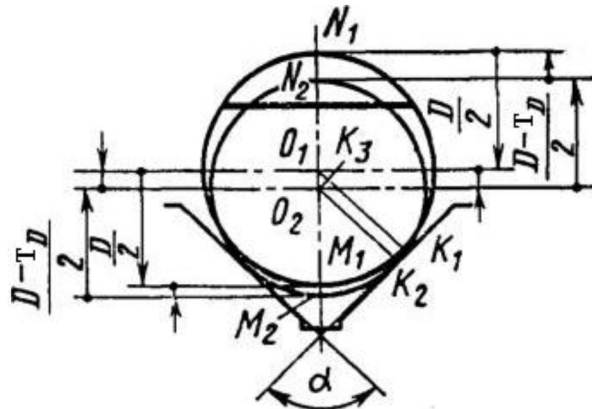


Рисунок 24 - Расчётная схема при фрезеровании лыски

Для **второго варианта** когда за исходную базу принята нижняя образующая цилиндрической поверхности, искомая величина будет равна колебанию положения этой образующей в направлении заданного размера (вертикальном): $\omega_{y.3} = M_1M_2$.

$$\omega_{y.3} = M_1M_2 = \frac{T_D}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} - 1 \right).$$

Для **третьего варианта**, когда за исходную базу принята верхняя образующая цилиндрической поверхности, искомая величина погрешности установки будет равна отрезку N_1N_2 ,

$$\omega_{y.3} = N_1N_2 = \frac{T_D}{2} \left(\frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} + 1 \right).$$

6.5 Погрешности установки, возникающие при несовмещении исходной и установочной баз

В практике машиностроения встречается много случаев, когда по тем или иным причинам не удастся совместить исходную и установочную базы

(ИБ≠УБ). При этом возникает погрешность установки заготовки. На **рисунке 25** показан эскиз обработки плоскости на размер A_1 . **Исходной базой** является верхняя плоскость, **установочной** - нижняя плоскость.

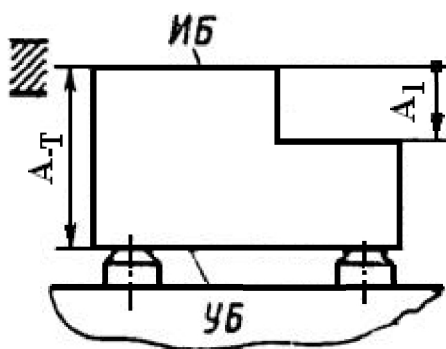


Рисунок 25 - Погрешность от несовмещения установочной и исходной баз

Даже если отсутствуют другие факторы, нарушающие точность установки, то за счёт колебания размера A , связывающего исходную и установочную базы в пределах допуска T_A , расстояние исходной базы от установочных элементов приспособления будет меняться от $A_{\max}$ до $A_{\min}$. Эта разность предельных расстояний исходной базы и является погрешностью установки. Количественно она равна допуску на размер, связывающий исходную и установочную базы- $\omega_{y,z} = T_A$. В некоторых случаях эту погрешность выделяют в отдельную группу и называют **погрешностью базирования**. Очевидно, что эта погрешность будет непосредственно влиять на точность операционного размера A .

Следует обратить внимание на принципиальное отличие погрешности от несовмещения баз (погрешности базирования) от первичных погрешностей установки заготовки в приспособлении в результате влияния двух причин. Если в рассмотренных выше случаях изменение положения исходной базы происходило через изменение положения установочной базы и, следовательно, через изменение положения всей заготовки, то при несовмещении исходной и установочной баз $\omega_{y,z}$ возникает в результате изменения положения исходной базы относительно установочной при стабильном положении установочной поверхности и всей заготовки.

7 Определение результирующей операционной погрешности

Определение суммарной погрешности может осуществляться двумя методами: **расчётно-аналитическим** и **статистическим**.

7.1 Расчётно-аналитический метод определения суммарной погрешности

При использовании данного метода придерживаются следующего порядка расчёта:

1. Выявляют перечень факторов, приводящих к появлению первичных погрешностей - износ, жёсткость, температура и т.п.
2. Определяют значения первичных погрешностей от влияния каждого фактора. При этом главная задача - определение полей рассеивания.

3. Выясняют законы распределения погрешностей (закон нормального распределения, Симпсона, равной вероятности и др.)

4. Суммируют найденные значения с учётом законов их распределения:

- случайные погрешности суммируют в соответствии с законом распределения (если он известен);

- погрешности, подчиняющиеся нормальному закону распределения - суммируют по правилу квадратного корня;

- погрешности, не подчиняющиеся закону распределения, суммируют алгебраически.

- систематические постоянные погрешности суммируются алгебраически, но с учётом знака.

В общем случае, для суммарной погрешности, можно применить следующую формулу:

$$\Delta_{\Sigma} = \sqrt{\omega_{\text{III}}^2 + k_{\Sigma}^2 (k_1^2 \Delta_1^2 + k_2^2 \Delta_2^2 + k_3^2 \Delta_3^2 + \dots + k_i^2 \Delta_i^2)}$$

где ω_{III} - постоянная для данной партии погрешность;

k_{Σ} - суммарный коэффициент относительного рассеивания первичных погрешностей;

$k_1, k_2, k_3, \dots, k_i$ - коэффициенты относительного рассеивания отдельных составляющих погрешностей, которые показывают степень отличия принятого закона распределения каждой погрешности от закона нормального распределения.

Аналитический метод является достаточно трудоёмким, громоздким, требует знания законов распределения отдельных погрешностей, что не всегда возможно, и, поэтому, он является недостаточно точным.

7.2 Статистический метод определения суммарной погрешности

Этот метод базируется на теории вероятностей и математической статистике. Имеет две разновидности: **метод кривых распределения** и **метод точностных диаграмм**.

7.2.1 Метод кривых распределения

Используется как в массовом, так и в серийном производствах. Метод заключается в следующем: из партии обработанных заготовок выбирается группа, проводятся замеры геометрических параметров, и выполняется статистический анализ. При статистическом анализе необходимо соблюдать следующие условия:

1. Для анализа берут детали, обработанные одним режущим инструментом или между двумя подналадками станка.

2. Измерение проводят измерительным инструментом с ценой деления не превышающей $(1/6 \dots 1/10)T$.

3. Число деталей, взятых для статистического анализа должно быть достаточно большим (желательно 50 и более, но не меньше 20 деталей).

Рассмотрим алгоритм определения суммарной погрешности обработки:

1. Производится обработка партии N деталей на настроенном оборудовании в автоматическом цикле.
2. Выполняется замер анализируемого геометрического параметра.
3. Строится практическая кривая распределения. Для этого определяют:
 - размах варьирования: $R = A_{\max} - A_{\min}$;
 - число интервалов K , которое зависит от размеров партии (при $N \leq 50 \dots 100$ шт., $K=5 \dots 7$);
 - размер интервала $C = R / K$;
 - частота попадания размеров в каждый интервал n_i ;
 - координаты середины интервалов $A_{срi}$.
 - строится практическая кривая распределения (рисунк 26).
4. Строится теоретическая кривая распределения (в большинстве случаев это кривая Гаусса). Её построение выполняют в следующем порядке:



Рисунок 26 – Кривые распределения

- определяется координата центра группирования размеров (средний размер) и среднее квадратичное отклонение по формулам:

$$A_{\text{ср}} = \frac{\sum A_{\text{ср}i} n_i}{N}, \quad \sigma = \sqrt{\frac{\sum (A_{\text{ср}i} - A_{\text{ср}})^2 n_i}{N}}$$

- определяются координаты y для характерных точек кривой Гаусса $\pm\sigma$, $\pm 2\sigma$, $\pm 3\sigma$;

- строится кривая Гаусса

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(A - A_{\text{ср}})^2}{2\sigma^2}}$$

5. Определяется суммарная погрешность. Для этого определяются:
 - погрешность от случайных и закономерно изменяющихся факторов

$$\Delta_p = 6\sigma;$$

- постоянная погрешность, вызванная неточностью настройки станка,

$$\Delta_n = |A_{\text{ср}} - A_{\text{тср}}|;$$

- суммарная погрешность $\Delta_{\Sigma} = 2\Delta_n + \Delta_p$.

Возможны следующие случаи расположения кривой относительно поля допуска:

1. $\Delta_{\Sigma} < T$, $\Delta_n = 0$ - обработка обеспечивает заданное качество;
2. $\Delta_{\Sigma} < T$, $\Delta_n \neq 0$ - требуется поднастройка станка;
3. $\Delta_{\Sigma} > T$, - возможно появление брака. Брак может быть не исправимый и исправимый.

Метод имеет следующий недостаток: полученная погрешность характеризует точность законченного процесса, а влияние случайных и закономерно изменяющихся факторов оценивается совместно, что не даёт возможности прогнозировать изменение точности в процессе дальнейшей обработки.

Раздельно определить влияние на точность случайных и закономерно изменяющихся погрешностей позволяет метод точностных диаграмм.

7.2.2 Метод точностных диаграмм

Используются три вида диаграмм: **точечные диаграммы, диаграммы групповых средних и точностные диаграммы хода технологического процесса.**

Точечные диаграммы

По горизонтальной оси откладываются номера деталей, последовательно обрабатываемых на станке, по вертикали - получаемые размеры (**рисунок 27**). Диапазон колебаний размеров показывает степень влияния случайных факторов, а тенденция к изменению размеров говорит о наличии закономерно изменяющегося фактора.

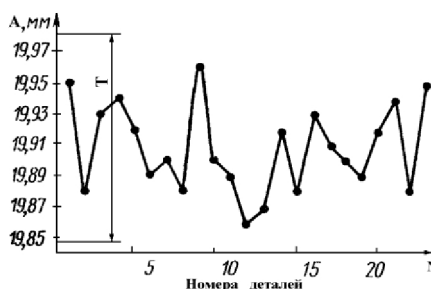


Рисунок 27 – Точечная диаграмма

Определяя размах варьирования $R = A_{\max} - A_{\min}$, путём сопоставления с заданным допуском T судят о стабильности хода технологического процесса.

Диаграммы групповых средних

Строится в тех же координатах, только по оси абсцисс откладываются номера групп обрабатываемых деталей, а по оси ординат - средние размеры заготовок, входящих в группу (**рисунок 28**):

$$A_{\text{ср}i} = \frac{\sum_{j=1}^m A_j}{m},$$

где m – число заготовок, входящих в группу (4 и более заготовок).

Например, $A_{\text{ср}1} = (A_1 + A_2 + A_3 + A_4) / 4$, $A_{\text{ср}2} = (A_5 + A_6 + A_7 + A_8) / 4$.

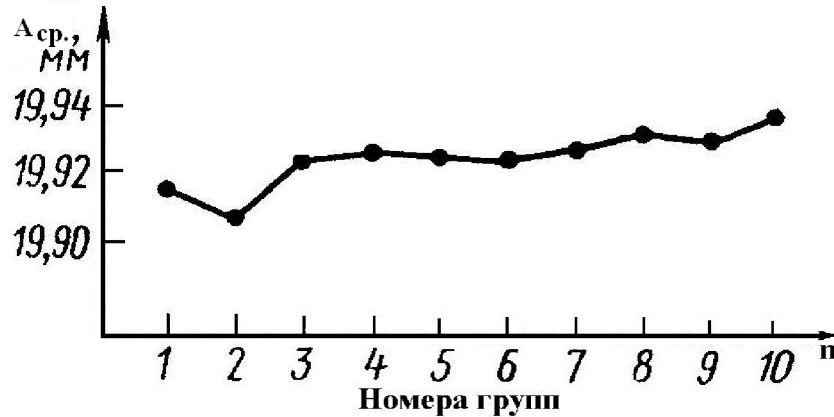


Рисунок 28 – Точностная диаграмма групповых средних

На этой диаграмме колебания случайных погрешностей резко уменьшаются за счёт осреднения, зато влияние закономерно изменяющихся погрешностей проявляется более наглядно и объективно.

По данной диаграмме можно определить тенденцию изменения размеров во времени под влиянием такого закономерно-изменяющегося фактора, как износ режущего инструмента.

Точностные диаграммы хода технологического процесса

Строятся в координатах: номера заготовок (время обработки) – размеры заготовок (**рисунок 29**). При этом для большей наглядности и для сокращения длины диаграммы, по одной вертикали откладываются размеры m заготовок группы. Размеры измеряются в процессе обработки.

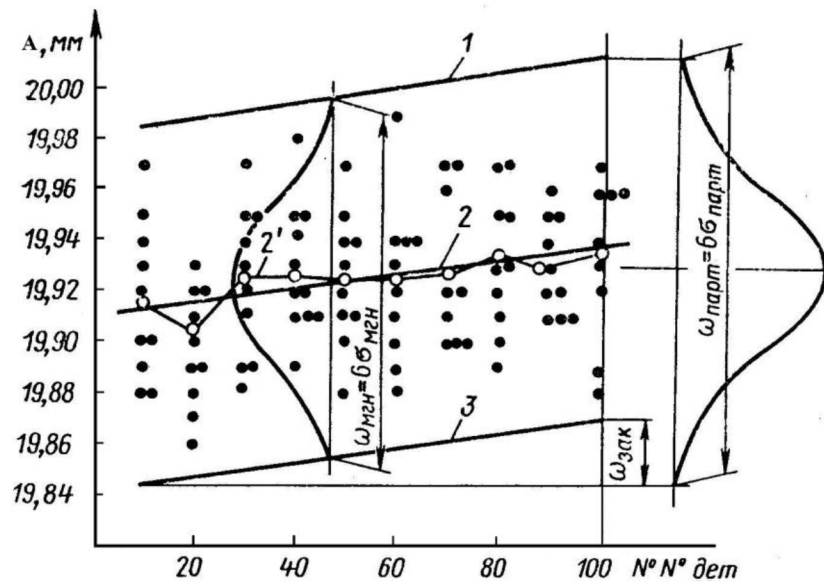


Рисунок 29 – Точностная диаграмма хода технологического процесса

Порядок построения диаграммы:

- строится линия групповых средних размеров (см. выше);
- подбирается закон изменения средних размеров и по методу наименьших квадратов определяется положение средней линии;
- для каждой совокупности деталей рассчитываются границы **мгновенного поля рассеивания**.

Мгновенным называется рассеивание, которое имела бы совокупность деталей под воздействием случайных факторов, действующих в данный момент времени без учёта влияния систематических погрешностей.

- наносятся границы мгновенных полей рассеивания и строится кривая мгновенного рассеивания $\omega_{\text{мгн.}} = 6\sigma_{\text{мгн.}}$;

- определяется суммарная погрешность обработки партии заготовок

$$\omega_{\text{парт.}} = \omega_{\text{мгн.}} + \omega_{\text{зак.}},$$

7.3 Технически достижимая и среднеэкономическая точность обработки

С повышением требований к точности обработки трудоёмкость и стоимость этой обработки увеличиваются. Это связано с тем, что для уменьшения погрешности необходимо использовать более точные станки и инструменты, снижать режимы резания, увеличивать число проходов. Выполнение этой работы требует использования рабочих высокой квалификации с более высокой оплатой труда. Зависимость времени (стоимости) обработки от точности для какого-либо метода описывается следующим уравнением:

$$T = T_0 + \frac{A}{\omega^k},$$

где T_0 - постоянная, соответствующая минимально возможной для данного метода обработки затрате времени; ω - суммарная погрешность; A, k - коэффициенты.

Эту зависимость можно условно разделить на три участка (**рисунок 30**).

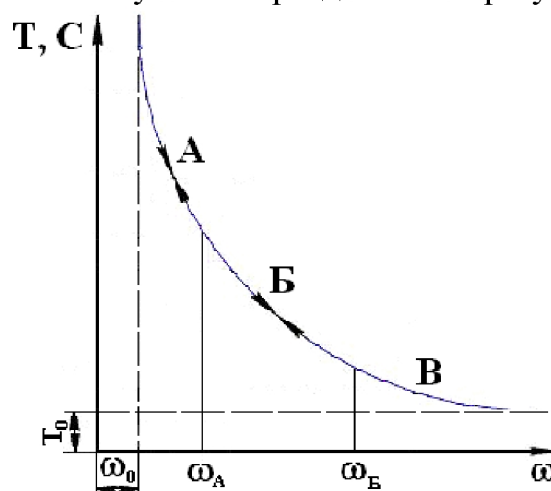


Рисунок 29 – Схема к определению среднеэкономической точности обработки

Участок А – область **технически достижимой точности** метода обработки. На этом участке, затрачивая значительное время и средства, можно получить лишь небольшое повышение точности. ω_0 - минимально достижимая

мая для данного метода погрешность обработки. Работа с допусками $\omega_0 < T < \omega_A$ протекает неустойчиво, может привести к браку и является не экономической.

Участок В- участок гарантированной точности. Здесь при небольшом увеличении времени можно значительно повысить точность. Область значений $\omega > \omega_B$ называют гарантированной точностью метода. Работа на этом участке также не экономична.

Участок Б - участок экономической точности. Данная точность обеспечивается в нормальных производственных условиях и при затратах времени и средств, не превышающих затрат для других способов, сравнимых с рассматриваемым методом.

Погрешность между ω_A и ω_B называется **среднеэкономической точностью обработки**. Эта точность приведена для различных методов обработки в справочниках и другой литературе.

Нормированные данные по средне-экономической точности определяются на основании эксперимента путём сопоставления нескольких альтернативных методов обработки для получения фиксированной точности. Например: обработка отверстия – сверление 1, растачивание 2 и зенкерование 3 (рисунок 31).

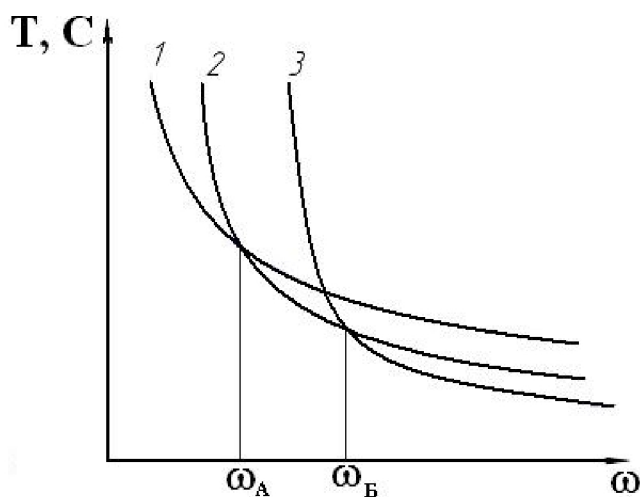


Рисунок 31 – Сравнение методов обработки

График показывает, что для обеспечения точности на участке 1-2 наиболее выгодно растачивание отверстия.

С течением времени, т.е. с развитием технического прогресса, средне-экономическая точность повышается.

ТЕМА 4: РАСЧЁТ ОПЕРАЦИОННЫХ РАЗМЕРОВ

1 Категории и значения припусков на механическую обработку

Припуск – слой материала, удаляемый с какой-либо поверхности заготовки при механической обработке.

Припуск измеряют по нормали к поверхности и отсчитывают **на размер**: для обработки цилиндрической поверхности - на диаметр (**двухсторонний симметричный припуск**), для обработки плоскости или торца - на координующий линейный размер (**односторонний припуск**).

Различают следующие **категории** припусков:

Общий припуск $z_{\text{общ.}}$ - слой металла, необходимый для выполнения всей совокупности технологических операций или переходов по обработке данной элементарной поверхности от заготовки до готовой детали.

Этот припуск состоит из припусков снимаемых на каждой ступени (этапе) обработки:

$$z_{\text{общ.}} = z_2 + z_3 + z_4 + \dots + z_k = \sum_{i=2}^k z_i ,$$

где k – число ступеней обработки; первая - заготовительная.

Общий припуск используется для предварительного расчёта размеров заготовки и зависит от обрабатываемого материала, размеров и шероховатости поверхности детали. Имеются таблицы для определения общих припусков на обработку. Общий припуск используется для приближённых расчётов, а затем уточняется через операционные припуски.

Операционный припуск - слой металла, снимаемый с поверхности заготовки при выполнении заданной ступени обработки (за однократную обработку), с целью обеспечения заданной точности и качества поверхности.

Различают следующие **значения** припусков: **номинальное, минимальное, максимальное и среднее (рисунок 1).**

Номинальное: $z_{\text{ном.}} = A_{i-1\text{ном.}} - A_{i\text{ном.}}$. Максимальное: $z_{\text{max}} = A_{i-1\text{max}} - A_{i\text{min.}}$

Минимальное: $z_{\text{min}} = A_{i-1\text{min}} - A_{i\text{max}}$.

Среднее: $z_{\text{ср.}} = A_{i-1\text{ср.}} - A_{i\text{ср.}}$

Эти припуски связаны между собой:

$$z_{\text{ном.}} = z_{\text{min}} + T_{i-1} = z_{\text{max}} - T_i ;$$

$$z_{\text{max}} = z_{\text{min}} + T_{i-1} + T_i$$

$$z_{\text{min}} = z_{\text{max}} - T_{i-1} - T_i = z_{\text{ном.}} - T_{i-1}$$

Следует отличать припуски на обработку от **напусков**. **Напуски** возникают в тех случаях, когда контур заготовки не соответствует контуру детали. При выполнении технологических размерных расчётов напуски не учитываются (не включаются в размерные цепи).

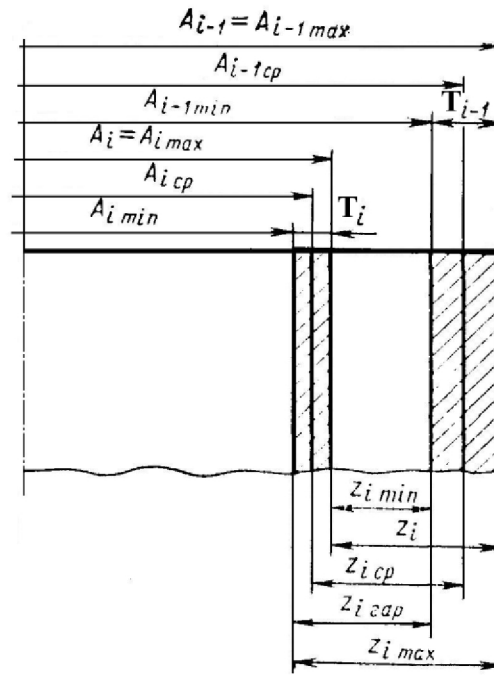


Рисунок 1 – Схема операционных припусков

2 Структура минимального операционного припуска

Минимальный припуск - это слой металла, необходимый и достаточный для осуществления заданной обработки.

Минимальный припуск является первичным операционным припуском, а все остальные припуски производными от него величинами.

При выполнении заданной (*i*-й) операции необходимо удалить все погрешности предшествующей (*i*-1) ступени обработки и компенсировать погрешности выполняемой ступени. Такими погрешностями являются (рисунок 2):

- шероховатость и дефектный слой (верхний слой металла, у которого структура, механические свойства, химический состав или все эти параметры одновременно отличаются от параметров основного материала);
- погрешности формы и расположения обрабатываемых поверхностей относительно заданных баз (приводят к неравномерности припуска).

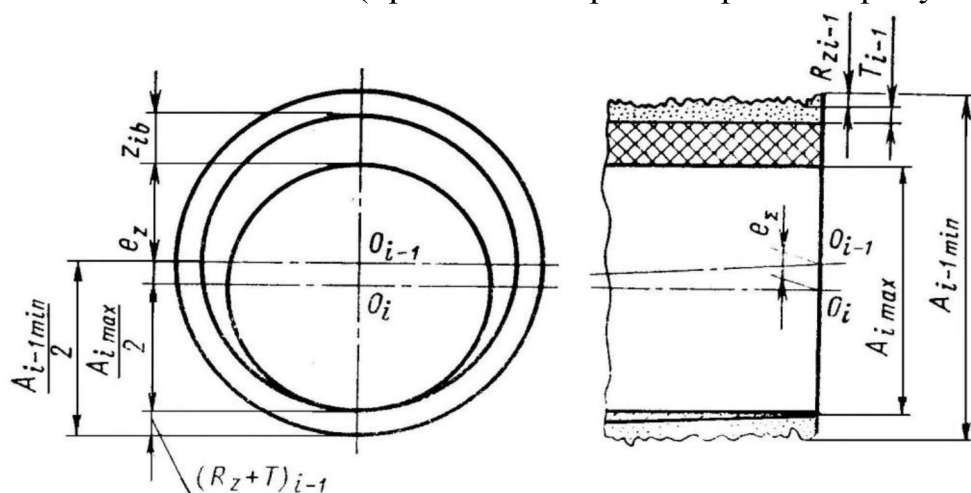


Рисунок 2 – Схема элементов операционного припуска

Таким образом, для достижения качественной обработки минимальный припуск должен быть таким, чтобы при его снятии обеспечивалось удаление шероховатости и дефектного слоя на любой обрабатываемой поверхности.

Структуру минимального припуска целесообразно представить в виде двух слагаемых:

$$z_{i \min} = z_{i a} + z_{i в} ,$$

где $z_{i a}$ -это регулярная одинаковая для всех участков обрабатываемой поверхности часть припуска или слой металла, который необходимо снять с заготовки для удаления шероховатости Rz и дефектного слоя металла H_d , после предыдущей обработки. Для плоскостей $z_{i a} = (Rz + H_d)_{i-1}$, для тел вращения $z_{i a} = 2(Rz + H_d)_{i-1}$.

$z_{i в}$ – составляющая, необходимая для компенсации неравномерности припуска, обусловленной пространственными отклонениями (ϵ) отдельных участков обрабатываемой поверхности. $z_{i в} = 2\epsilon$.

Тогда **минимальный припуск** будет равен:

- для плоских поверхностей $z_{i \min} = (Rz + H_d)_{i-1} + \epsilon$,
- для тел вращения $z_{i \min} = 2(Rz + H_d)_{i-1} + 2\epsilon$.

Причинами возникновения неравномерности припуска являются:

1. Погрешность установки, допущенная на операции для которой определялся припуск;
2. Погрешность установки, допущенная на предшествующей (обработка наружной поверхности на базе внутренней).
3. Погрешность координирующих размеров при обработке отверстий в корпусных деталях.
4. Погрешность формы.

3 Методы определения припусков на обработку

В машиностроении используются два метода определения припусков: **нормативный** (табличный) и **расчётно-аналитический** (поэлементный).

Нормативный – находит наибольшее применение на практике. Для различных материалов и ступеней обработки разработаны нормативные таблицы, в которых приведены значения номинальных припусков:

$$z_{\text{ном.}} = z_{\min} + T_{i-1} = z_{i a} + z_{i в} + T_{i-1}$$

Точность нормативного метода получается намного выше, если использовать не номинальный, а минимальный припуск ($z_{\min} = z_{i a} + z_{i в}$). Для этого разработаны таблицы минимальных припусков.

Нормативный припуск назначен для некоторых осреднённых, типичных условий обработки. В конкретном случае – это значение может быть либо больше, либо меньше необходимой величины припуска. Большие - приводят к перерасходу материала и удорожанию стоимости обработки. Меньшие - приводят к браку в процессе изготовления («чернота» – следы предшествующей ступени обработки).

Достоинства метода: проста, удобство, малая трудоёмкость.

Недостаток: не оптимальные значения припусков.

Расчётно-аналитический – предполагает поэтапное определение припуска. Так как $z_{i \min} = 2(R_z + H_d)_{i-1} + 2\varepsilon$, то для его определения необходимо определить отдельные составляющие (расчётным и нормативным путём).

Достоинства: метод более точный по сравнению с первым, т.к. он учитывает структуру ТП и позволяет получать значения припусков, близкие к оптимальным.

Недостатки: - значительная трудоёмкость вычислительных работ, необходимость создания нормативных материалов для выбора и расчёта элементов припуска.

4 Операционные допуски и правила их выбора

При проектировании технологического процесса обработки заготовок необходимо назначить допуски на операционные размеры всех ступеней обработки поверхности. Завышенный допуск (пониженная точность) приводит к увеличению количества заготовок, обрабатываемых за одну наладку, облегчению наладки и снижению квалификации наладчика.

Недостатком завышения допуска является:

- снижение коэффициента использования материала за счёт увеличения колебания припуска;
- повышение нормы расхода материала.

При выборе операционных допусков необходимо придерживаться следующих правил:

Правило 1. Величину операционного допуска следует принимать в соответствии со средне-экономической точностью используемого метода обработки. Например, заготовка (штамповка)-14 кв., черновое точение-12кв., чистовое точение – 10-11 кв.

Правило 2. Допуск на размер в операции окончательной обработки, выполняемой на неавтоматизированном оборудовании по способу пробных проходов и промеров (например, при шлифовании наружных и внутренних поверхностей, плоскостей и торцов), следует принимать равным допуску, заданному в рабочем чертеже детали. Для остальных случаев обработки по настройке остается в силе **Правило 1**.

Правило 3. Система простановки допуска на операционный размер должна быть такой, чтобы поле допуска отсчитывалось в металл (A_{-TA} или A_{+TA}). Это правило распространяется только на размеры, получаемые при механической обработке. Допуски на размеры заготовок проставляются по двухсторонней системе.

Правило 4. Допуски на размеры, выполняемые на окончательных операциях обработки, выбирают в соответствии с экономической точностью используемого метода обработки и в том случае, если по чертежу требуется меньшая точность выдерживаемого размера. Это правило необходимо применять, когда цель обработки не достижение заданной точности размера, а выполнение других требований. Например, для обработки кольца достаточно черновой обработки ($h12, T=0,21$), но для получения шероховатости $Ra=1,25$

мкм необходима ещё чистовая (**h11**, $T=0,13$) и окончательная обработка (**h9**, $T=0,052$).

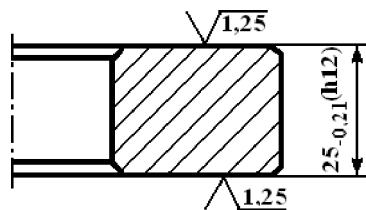


Рисунок 3 – Допуски на размеры, выполняемые на окончательных операциях обработки

Правило 5. Если размер, координирующий положение обрабатываемой поверхности, отсчитывается от ещё не обработанной базы, то допуск следует назначать на 1 квалитет ниже квалитета экономической точности метода обработки.

Например, первая черновая обработка $A=40_{-0,25}^{+0,12}$ (**h12**), а необходимо проставить $A=40_{-0,39}^{+0,18}$ (**h13**)

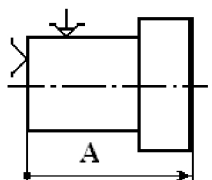


Рисунок 4 – Размеры координирующие положение обрабатываемой поверхности

Правило 6. Допуски на внутриоперационные размеры назначаются на 1 квалитет выше, чем на межоперационные размеры (влияет погрешность установки) A_1 (**h12**), A_2 (**h11**).

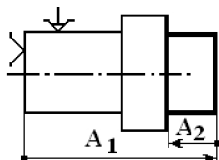


Рисунок 5 – Допуски на внутриоперационные размеры

Правило 7. Допуски на размеры, координирующие положение осей отверстий, следует проставлять по двухсторонней симметричной системе (например, $A \pm 0,20$ мм).

Правило 8. Если размер, выдерживаемый в данной операции, влияет на точность других размеров детали, то допуск на него определяется на основе решения соответствующих размерных цепей (часто принимается по более высокому квалитету, чем экономическая точность).

5 Основные понятия и определения теории размерных цепей

Практически все задачи, связанные как с проектированием изделий, так и с разработкой технологических процессов их изготовления, решаются с помощью теории размерных цепей.

Размерной цепью (в соответствии с ГОСТ) называют совокупность размеров образующих замкнутый контур и непосредственно участвующих в ре-

шении поставленной задачи. Размерные цепи состоят из **звеньев**, которыми могут быть любые размеры, а также отклонения размеров.

В зависимости от **решаемой задачи**, размерные цепи разделяют на **конструкторские, технологические и измерительные**.

Технологическими называют размерные цепи, звеньями которых являются операционные размеры, припуски, а также конструкторские размеры.

В зависимости от **расположения звеньев** различают размерные цепи:

- **пространственные** (звенья лежат в разных плоскостях и разнонаправлены);
- **линейные** (звенья параллельны и лежат в одной плоскости);
- **плоские** (звенья лежат в одной плоскости, но под различными углами друг к другу);
- **векторные** (звенья – векторы – существенно-положительные величины (биения, разностенности, эксцентриситеты));
- **угловые** (звенья – углы).

Имеют место и **смешанные** цепи, в состав которых входят и линейные (скалярные) и векторные звенья.

Большинство технологических размерных расчетов выполняют с использованием **линейных** цепей.

Звенья размерной цепи делятся на **замыкающие и составляющие**.

Замыкающее звено- это размер, который в процессе обработки непосредственно не выдерживается, а получается в результате выполнения других - составляющих звеньев. В технологических размерных цепях замыкающим звеном может быть припуск, конструкторский размер или другой размерно-точностной параметр, непосредственно не выполняемый по технологическому процессу.

Составляющее звено – размер, изменение которого вызывает изменение замыкающего звена, т.е. реально выполняемые операционные размеры. Составляющими звеньями могут быть операционные размеры, а также размеры, регламентирующие взаимное расположение поверхностей, которые непосредственно выдерживаются и контролируются при обработке заготовок.

Главная задача РЦ – обеспечить выполнение заданного замыкающего размера с его допуском. РЦ – есть уравнение с одним неизвестным. Этим неизвестным является одно из составляющих звеньев. Безошибочное его определение и обеспечит выполнение главной задачи. Отметим, что иногда в РЦ могут оказаться и два неизвестных звена. В этом случае нужно отыскивать и вторую РЦ с теми же неизвестными, чтобы решать систему из двух уравнений.

В зависимости от **влияния на замыкающее звено** составляющие звенья разделяют на **увеличивающие и уменьшающие**.

Увеличивающие - звенья, при увеличении которых замыкающее звено увеличивается ($\vec{A}$).

Уменьшающие - звенья, при увеличении которых замыкающее звено уменьшается ($\overleftarrow{A}$).

Для построения технологических размерных цепей необходимо иметь **исходную информацию** в виде рабочего чертежа детали (**рисунок 3**) и операционных эскизов на операции.



Рисунок 6 – Рабочий чертёж и операционные эскизы

На основании эскизов строится **комплексная размерная схема** технологического процесса, а затем выявляются и строятся размерные цепи.

На комплексную схему (**рисунок 4**) наносят все операционные и конструкторские размеры, а также снимаемые припуски. Каждую размерную цепь строят относительно её **замыкающего звена**, которое находится исходя из поставленной задачи.

Состав цепи не зависит от того, с какого размера начинают и в каком направлении выполняют построение размерной цепи. Главное условие при построении цепи - это замкнутость контура. Кроме того, **необходимо соблюдать следующее правило** - в составе размерной цепи может быть только один замыкающий размер

После построения необходимо составить уравнения размерных цепей. При этом звенья, направленные в **одну сторону**, записывают со знаком **плюс**, а в **противоположную** - со знаком **минус**:

$$\begin{aligned} \text{РЦ1 } \text{KR2} - \text{A}_5 &= 0; & \text{РЦ2 } \text{KR1} + \text{A}_4 - \text{A}_5 &= 0; \\ \text{РЦ3 } \text{KR3} + \text{A}_6 - \text{A}_4 &= 0; & \text{РЦ4 } z_5 + \text{A}_5 - \text{A}_3 &= 0; \\ \text{РЦ5 } z_6 - \text{A}_2 + \text{A}_3 - \text{A}_4 &= 0; & \text{РЦ6 } z_3 + \text{A}_3 - \text{A}_1 &= 0. \end{aligned}$$

Для решения уравнений их переписывают относительно замыкающего звена:

$$\begin{aligned} \text{РЦ1 } \text{KR2} &= \text{A}_5; & \text{РЦ2 } \text{KR1} &= \text{A}_5 - \text{A}_4; & \text{РЦ3 } \text{KR3} &= \text{A}_4 - \text{A}_6; \\ \text{РЦ4 } z_5 &= \text{A}_3 - \text{A}_5; & \text{РЦ5 } z_6 &= \text{A}_2 + \text{A}_4 - \text{A}_3; & \text{РЦ6 } z_3 &= \text{A}_1 - \text{A}_3. \end{aligned}$$

В общем случае для линейных размерных цепей уравнение замыкающего звена может быть представлено в виде:

$$A_A = \sum_m \vec{A} - \sum_n \overleftarrow{A},$$

где **m** - число увеличивающих звеньев; **n** - число уменьшающих звеньев.

Основой решения размерных цепей является **правило суммирования допусков** (погрешностей), устанавливающее связь между допусками (погрешностями) составляющих и замыкающих звеньев- **допуск (погрешность)**

замыкающего звена равен арифметической сумме допусков (погрешностей) составляющих звеньев:

$$T_A \geq \sum_{i=1}^n T_i$$

Уравнения размерных цепей могут решаться разными способами.

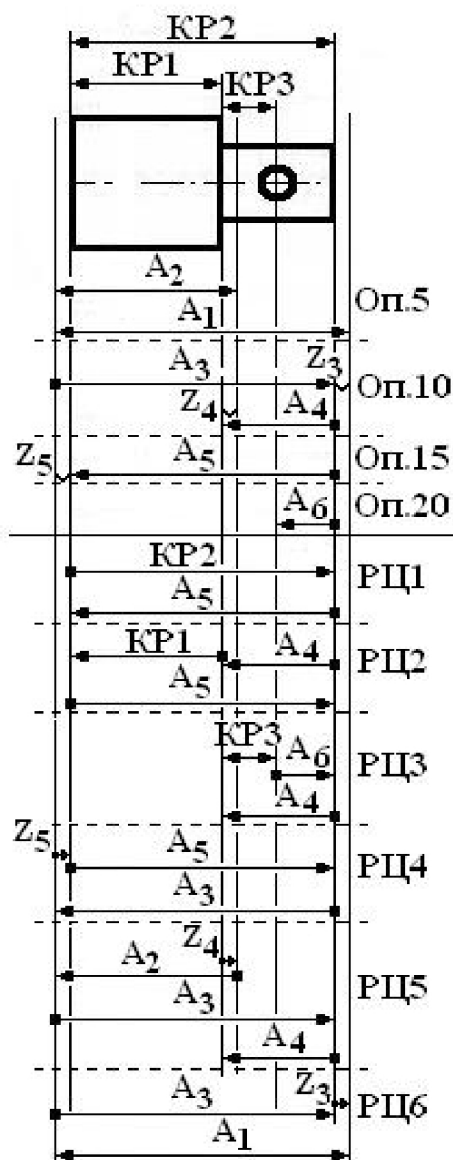


Рисунок 7 – Комплексная размерная схема

6 Методы решения размерных цепей

В зависимости от того, какие параметры заданы, а какие являются неизвестными, существует два вида решаемых с использованием размерных цепей задач- **проектные** (прямые) и **проверочные** (обратные).

Проектная задача состоит в том, чтобы по заданным параметрам замыкающего звена определить параметры составляющих звеньев.

Проверочная задача состоит в том, чтобы по известным параметрам составляющих и замыкающих звеньев определить (проверить) значения замыкающих звеньев.

В практике машиностроения используются два метода решения размерных цепей: **метод полной взаимозаменяемости** (расчёт на максимум- минимум) и **теоретико-вероятностный**.

Метод полной взаимозаменяемости предполагает, что размеры принимают крайние, т.е. **максимальные** или **минимальные** значения. Формула расчёта по этому методу имеет вид:

$$\text{для допусков } T_{\Delta} \geq \sum_{\text{min}} T; \text{ для погрешностей } \omega_{\Delta} \geq \sum_{\text{min}} \omega$$

До определения операционных размеров необходимо для каждой размерной цепи, в которой замыкающим размером является конструкторский размер, проверить и обеспечить выполнение условия

$$T_{\Delta} \geq \sum_{\text{min}} T \quad (1)$$

Для этого ещё неизвестные составляющие размеры определяются приближенно, по номиналам рабочего чертежа, а допуски на них назначаются в соответствии с экономической точностью той операции, в которой они выполняются.

В случае если соотношение (1) не выполняется, приходится назначать более жесткие допуски на составляющие звенья в сравнении с рекомендуемыми (ужесточать допуски). Затем при решении размерных цепей используются только эти ужесточенные допуски.

Достоинства метода: простота, отсутствие брака, отсутствие необходимости знать законы вероятностного распределения составляющих звеньев.

Недостатки: расчёт базируется на предположении, что все размеры входят в цепь с предельными значениями; вероятность этого мала.

Теоретико-вероятностный метод - предполагает, что размеры составляющих и замыкающих звеньев могут изменяться случайным образом.

Допуск замыкающего звена по этому методу определяется по формуле:

$$T_{\Delta} = \frac{1}{k_{\Delta}} \sqrt{\sum_{\text{min}} k_i^2 T_i^2}$$

где k_{Δ} , k_i - коэффициенты относительного рассеяния замыкающего и составляющего звеньев. Они характеризуют степень отличия распределения погрешностей размеров от закона нормального распределения. Коэффициент k_i принимают: $k_i = 1,0$ - для закона нормального распределения; $k_i = 1,22$ - для закона Симпсона; $k_i = 1,73$ - для закона равной вероятности;

t_{Δ} - коэффициент, выбираемый в зависимости от процента риска. При риске $P = 0,27\%$ $t_{\Delta} = 3,0$.

Коэффициент относительного рассеяния замыкающего звена k_{Δ} определяется по формуле П.Ф. Дунаева.

Достоинства метода: учитывает реальную картину при конструировании и изготовлении изделий; позволяет значительно расширить допуски на составляющие звенья.

Недостатки: необходимо знать законы вероятностного распределения составляющих звеньев; громоздкие формулы для расчёта коэффициентов; вероятность появления брака.

7 Способы решения размерных цепей

В машиностроении применяют четыре способа расчёта размерных цепей, которые отличаются способом записи уравнений размерной цепи и применяемым методом решения.

1. Способ предельных значений.

Этот способ предполагает использование метода расчёта на максимум-минимум. Расчёт производится в следующем порядке:

- записывается уравнение размерной цепи относительно замыкающего звена

$$A = \sum_m A - \sum_n A;$$

- записываются уравнения предельных значений замыкающего звена

$$\begin{aligned} A_{\max} &= \sum_m A_{\max} - \sum_n A_{\min}, \\ A_{\min} &= \sum_m A_{\min} - \sum_n A_{\max}; \end{aligned}$$

- проверяется условие $T_A \geq \sum_{m+n} T$;
- из любого уравнения $A_{\Delta \max}$ или $A_{\Delta \min}$ находят $A_{i \max}$ или $A_{i \min}$, выбирая значение для записи в операционной карте (вал или отверстие).

2. Способ отклонений. Этот способ также предполагает использование метода расчёта на максимум- минимум. Расчёт производится в следующем порядке:

- записывается уравнение размерной цепи для определения номинала замыкающего звена

$$A = \sum_m A - \sum_n A$$

- записываются уравнения для определения его верхнего и нижнего отклонений:

$$\begin{aligned} \Delta_A &= \sum_m \Delta_A - \sum_n \Delta_A \\ \Delta_A &= \sum_m \Delta_A - \sum_n \Delta_A; \end{aligned}$$

- проверяется условие $T_A \geq \sum_{m+n} T$;
- из любого уравнения $\Delta_{вд}$ или $\Delta_{нд}$ находят Δ_{vi} или Δ_{ni} и искомый размер.

Необходимо учитывать тот факт, что отклонения, в отличие от допусков, имеют знак и поэтому уравнения должны решаться с учётом знаков отклонений.

3. Способ средних значений. Этот способ предполагает использование как метода расчёта на максимум- минимум, так и теоретико- вероятностного метода (при симметричном законе распределения). Расчёт производится в следующем порядке:

- записывается уравнение размерной цепи для определения среднего значения замыкающего звена:

$$A = \sum_m A - \sum_n A;$$

- проверяется условие $T_A \geq \sum_{m+n} T$.

Если оно выполняется, то используется метод расчёта на максимум- минимум, а если не выполняется, то применяют теоретико- вероятностный метод;

- определяется среднее значение искомого звена, а затем и номинальное значение $A_i = A_{i \text{ ср.}} \pm 0,5T_i$.

3. Способ координат допусков. Этот способ предполагает использование теоретико- вероятностного метода. Применяется когда одно или несколько звеньев имеют не симметричный закон распределения.

8 Расчёт диаметральных операционных размеров

Расчёт диаметральных операционных размеров может выполняться на основе **номинальных** либо **минимальных** значений припусков.

При использовании номинального значения припуска:

$$D_{i-1} = D_i + z_i - \text{для вала};$$

$$D_{i-1} = D_i - z_i - \text{для отверстия}.$$

При расчёте на основе минимального значения припуска:

$$D_{i-1} = D_i + z_{i \text{ min}} + T_{i-1} - \text{для вала};$$

$$D_{i-1} = D_i - z_{i \text{ min}} - T_{i-1} - \text{для отверстия}.$$

При определении размеров заготовки в этих уравнениях включают не всю величину допуска, а только ту часть, которая отсчитывается в металл.

Расчёт начинают с установления размера, припуска и допуска для операции окончательной обработки поверхности, для которой размер и допуск равны чертёжным, а заканчивают определением размеров заготовки.

Допуски и припуски назначают по таблицам либо рассчитывают (припуски).

ТЕМА 5: МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

1 Понятие о технической подготовке производства

Техническая подготовка производства к изготовлению нового изделия состоит из следующих этапов (ГОСТ 14001-73):

- **конструкторская подготовка;**
- **технологическая подготовка;**
- **организационная подготовка.**

Первый этап включает работы, связанные с обоснованием, проектированием, доводкой изделия, документированием и передачей в серийное производство.

Технологическая подготовка производства включает мероприятия по обеспечению готовности предприятия к выпуску нового изделия: проектирование технологических процессов изготовления деталей, сборочных единиц, окончательной сборки изделия, проектирование оснащения, технологических процессов приспособлениями, режущими и контрольными инструментами, испытательными устройствами. Всё это выполняется с учетом серийности производства.

Организационная подготовка включает разработку календарных планов производства новой продукции, снабжение производства всем необходимым для реализации производственного задания.

2 Виды технологических процессов

В зависимости от **стадии проектирования** изделия технологические процессы делятся на **проектные** и **рабочие**.

Проектный - выполняется по предварительному проекту технологической документации, который разрабатывается на стадиях проектирования изделия – "**Эскизный проект**", "**Технический проект**".

Рабочий технологический процесс - выполняется по рабочей технологической или конструкторской документации.

В зависимости от **количества наименований изделий**, охватываемых процессом, технологические процессы делятся на **единичные, типовые и групповые** (ГОСТ 3.1109-82).

Единичный - проектируется и применяется для изготовления деталей одного наименования, независимо от типа производства.

Типовой - характеризуется единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для группы изделий с общими конструктивными признаками (диски, лопасти и т.п.). Основой разработки типовых технологических процессов является классификация всего множества деталей по сходству конструктивно-технологических признаков. По этим признакам детали могут быть разделены на классы, подклассы, типы и группы. При этом сходство признаков всё более возрастает.

Типовой процесс (ГОСТ 14301-83) разрабатывается для изготовления конкретного типа деталей в определенных производственных условиях. Ти-

пизация обеспечивает устранение многообразия технологических процессов путём сведения их к ограниченному числу и является основой для их стандартизации.

Применяется, в основном, как основа для разработки единичных (рабочих) технологических процессов.

Групповой - проектируется и применяется для изготовления группы деталей одного наименования с общими **конструктивно-технологическими** признаками. Применяется в единичном и мелкосерийном производствах.

Метод групповой обработки предложен проф. С.П. Митрофановым и является развитием идей типизации. Достоинства метода в том, что на его основе условия мелкосерийного производства с использованием оборудования с низкой производительностью можно превратить в крупносерийное высокопроизводительное производство, получив при этом снижение трудоёмкости и стоимости изготовления деталей.

Групповые технологии реализуются следующим образом: среди деталей группы находится, а за неимением таковой специально разрабатывается деталь, имеющая все поверхности деталей, входящих в группу (рисунок 1).

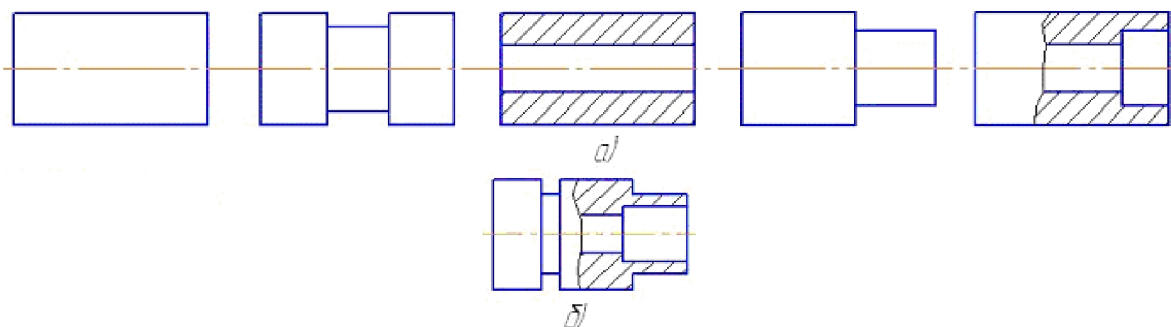


Рисунок 1 - Детали группы (а) и комплексный представитель группы (б)

Эта деталь является **комплексным представителем группы**, и для её изготовления настраивается высокопроизводительный станок (револьверный, автомат, СЧПУ). При обработке деталей одного наименования используют только те инструменты (и переходы), которые обеспечивают получение требуемой конфигурации; другие инструменты не задействованы и будут работать в свою очередь при обработке других заготовок, для получения деталей других наименований.

Для реализации групповых технологий проектируют и специальную групповую оснастку, отличающуюся лишь базирующими элементами.

По степени детализации технологические процессы делятся на:

Маршрутный технологический процесс - содержит только перечень выполняемых операций без указания переходов и режимов обработки.

Операционный технологический процесс - содержит полную информацию по выполнению операций.

Маршрутно-операционный технологический процесс - выполняется по документации, в которой отдельные операции представлены без указания переходов и режимов резания.

3 Исходные данные для проектирования технологических процессов

Исходными данными для проектирования являются:

1. Рабочий чертёж детали.
2. Объём выпуска и сроки выполнения (определяют тип производства).
3. Сведения об оборудовании (каталоги станков, перечень и паспортные данные имеющегося оборудования).
4. Руководящие материалы - стандарты, нормали, РТМ и др.
5. Типовые или аналогичные проектируемому технологические процессы.
6. Методики расчётов - экономических, операционных размеров и др.

4 Последовательность разработки единичных технологических процессов

Проектирование единичных технологических процессов можно условно разделить на ряд последовательно решаемых задач:

1. Изучение и технологический анализ рабочего чертежа детали.
2. Выбор вида, способа получения и формы заготовки.
3. Разработка плана операций и формирование этапов технологического процесса (маршрутной технологии):
 - 3.1. Выбор числа ступеней обработки поверхностей.
 - 3.2. Определение последовательности обработки поверхностей.
 - 3.3. Выбор технологических баз.
 - 3.4. Формирование операций и разделение технологического процесса на этапы.
 - 3.5. Разработка технических требований на операции.
 - 3.6. Выбор оборудования, средств механизации и автоматизации технологического процесса.
4. Экономический анализ вариантов выполнения операций.
5. Расчёт операционных размеров.
6. Расчёт режимов резания, нормирование операций.
7. Выбор универсальной и нормализованной оснастки и разработка заказа на проектирование специальной оснастки.
8. Оформление технологической документации.

5 Изучение и анализ рабочего чертежа детали

Рабочий чертёж содержит геометрическую информацию об объекте технологического проектирования. Подробное изучение рабочего чертежа, технических условий на изготовление и условий работы детали в изделии – всё это предшествует проектированию технологического процесса.

Изучение рабочего чертежа имеет **целью** уяснение всех требований, предъявляемых конструктором к детали – по размерам, форме, точности, количеству поверхностей (шероховатости, твердости и др.), точности взаимного расположения поверхностей. Все эти требования должны быть надёжно обеспечены проектируемым технологическим процессом.

В рабочих чертежах часто указывается группа контроля механических свойств материала детали (ОСТ 1.00021-72). К первой группе контроля отно-

сят детали особо ответственные, определяющие надежность эксплуатации изделия – нагруженные валы, диски, зубчатые колеса. Контроль механических свойств деталей I группы выполняют для каждой заготовки на специально вырезанных из неё образцах. Образцы испытывают по всем показателям прочности в заводской лаборатории. При неудовлетворительных результатах испытаний заготовка бракуется.

Ко II группе контроля относят менее ответственные детали, работающие, однако, в достаточно напряженных условиях. Образцы для испытаний получают вырезкой из 1-2 заготовок партии, а при неудовлетворительных испытаниях бракуют всю партию.

Кроме контроля механических свойств на деталях I и II групп измеряется и твердость.

На деталях III группы контроля измеряют лишь твердость.

Часть образцов сопровождает заготовку и подвергается всем операциям, влияющим на формирование механических свойств вместе с заготовкой, и испытываются после этих операций.

В рабочих чертежах могут быть указаны и конкретные упрочняющие операции на финише технологического процесса, которые должны быть безусловно выполнены.

В результате изучения и анализа чертежа у технолога должно сформироваться четкое представление о геометрии детали (конфигурация, формы поверхностей, их взаимное расположение т.п.), что позволяет выбрать необходимое количество этапов обработки поверхностей.

Технологический анализ необходимо проводить в следующей последовательности:

1. Изучаются размеры детали и требуемая точность. Допуски на свободные размеры назначаются по соответствующим нормам.
2. Определяются основные и вспомогательные конструкторские базы.
3. Изучается точность взаимного расположения поверхностей (параллельность, соосность, перпендикулярность и др.).
4. Изучаются требования к шероховатости поверхности, упрочнению и отделке поверхностей.
5. Изучаются требования к термообработке поверхностей.
6. Изучаются требования к материалу и способу получения заготовки.

В результате анализа по согласованию с конструктором могут быть введены коррективы в рабочий чертёж, позволяющие улучшить технологичность конструкции детали. Например:

- возможно уменьшение размеров обрабатываемых поверхностей, что снижает трудоёмкость механической обработки;
- повышение жёсткости детали, что даёт возможность многоинструментальной обработки;
- облегчение подвода и отвода режущего инструмента, что уменьшает основное и вспомогательное время;
- унификацию размеров пазов, канавок, отверстий и других элементов, что сокращает номенклатуру размерных и профильных инструментов и уменьшает время обработки;

- обеспечение надёжности и удобства базирования заготовки; возможность совмещения установочных и измерительных баз;
- удобство многоместной обработки заготовок.

При улучшении технологичности конструкции значительно снижается трудоёмкость и повышается рентабельность процессов механической обработки.

В заключении делается вывод о **технологичности** детали.

Под технологичностью понимают такие свойства конструкции детали, которые обеспечивают возможность её изготовления с наименьшими затратами при заданном качестве. Она определяется рядом **качественных** и **количественных** показателей.

Качественные и характеризуют технологичность по форме, материалу и процессу изготовления детали. С точки зрения изготовления деталь должна обладать: инструментальной доступностью, жесткостью, хорошей обрабатываемостью, простыми и протяжёнными технологическими базами и т.п.

Количественные показатели - трудоёмкость, технологическая себестоимость и др.

6 Выбор вида и способа получения заготовки

Для изготовления деталей авиационных двигателей используют следующие виды заготовок: прокат, поковки, отливки и комбинированные заготовки (штампо-сварные).

Вид заготовки зависит от материала, конфигурации и её габаритных размеров. Как правило, конструктор назначает вид заготовки - штамповка, литьё и т.п. Но в пределах вида заготовки выбор способа её получения является многовариантной задачей (например, отливка из сплава АЛ5 может быть получена литьём в землю, в кокиль, под давлением) (рисунки 2).

Она решается путём экономических расчётов. Более совершенная заготовка (а, значит, и более дорогая) даёт точную заготовку, что сокращает объём последующей механообработки (а, значит, уменьшает затраты на обработку заготовки). Сопоставление затрат и экономии даёт ответ о целесообразности использования более совершенной заготовки.

Большое значение при этом имеет тип производства. Чем он крупнее, тем более совершенный и метод получения заготовки. Выбирается вариант, который обеспечивает минимум затрат по заготовительному и механическому цехам.

Отметим, что в производстве ДЛА часто экономические соображения отходят на второй план, уступая соображениям качества, обеспечивая более совершенной заготовкой.

Выбор заготовки обязательно согласуется со специалистами кузнечных или литейных цехов.



7 Разработка плана операций и формирование этапов технологического процесса

7.1 Выбор числа ступеней обработки поверхностей

На число ступеней обработки влияют следующие факторы:

1. Точность формы и размеров заготовки. Чем выше точность, тем меньше потребуются ступеней обработки.

2. Требуемая по чертежу точность формы и размеров поверхности. Чем выше требуемая точность, тем большее число ступеней обработки потребуется. Например, заготовка – штамповка. Если точность размера 12 кв. - требуется одна ступень - черновая обработка; точность 10 кв. - две ступени - черновая и чистовая обработка; точность размера 8...9 кв. - требуется три ступени - черновая, чистовая, шлифование обработка.

Для количественной оценки зависимости числа ступеней n обработки используется понятие уточнения.

Уточнением называют отношение величины допуска заготовки $T_{\text{заг}}$ к величине допуска на деталь $T_{\text{дет}}$.

$$\epsilon_n = \frac{T_{\text{заг}}}{T_{\text{дет}}}$$

Аналогично можно говорить об уточнениях на каждой ступени обработки

$$\epsilon_n = \frac{T_{i-1}}{T_i},$$

где T_{i-1} , T_i – допуски соответственно на предшествующей и выполняемой ступенях обработки.

Если первой операцией считать заготовительную, а операции окончательной обработки присвоить индекс n , то расчётное уточнение технологического процесса равно произведению уточнений отдельных операций:

$$\varepsilon_n = \varepsilon_2 \varepsilon_3 \dots \varepsilon_n$$

Для машиностроения характерны следующие значения уточнений для различных ступеней обработки:

- черновые операции $\varepsilon_{\text{чер}} = 4 \dots 6$;
- чистовые операции $\varepsilon_{\text{чист}} = 3 \dots 4$;
- окончательные операции $\varepsilon_{\text{ок}} = 1,5 \dots 2,0$

3 Требуемая точность взаимного расположения поверхностей.

Например, допуск на размер $20_{-0,5}$ предполагает одну ступень обработки, но требования по биению добавляют еще одну ступень-шлифование (рисунок 3).

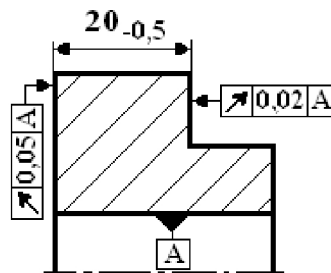


Рисунок 3 – Чертёж детали

4. Требуемое качество поверхности. Например, при шероховатости $R_z = 40$ мкм необходима одна ступень, $R_z = 20$ мкм - две ступени, $R_a = 1,25$ мкм – три ступени.

5. Наличие и характер термической обработки. Наличие термообработки увеличивает число обработок поверхностей на 1...2 ступени. Причём это относится не только к поверхностям подвергаемым термообработке, но и к остальным, т.к. они тоже теряют свою точность.

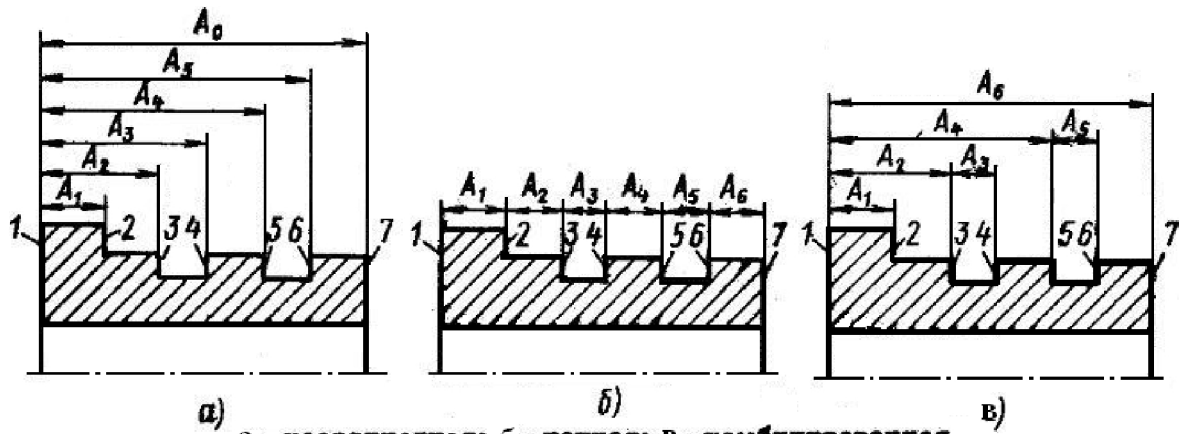
6 Роль поверхности в процессе обработки. Если поверхность, не являющаяся точной по чертежу, используется, в силу конструктивных особенностей детали, в качестве установочной базы, то назначают дополнительную ступень обработки.

7.2 Определение последовательности обработки поверхностей

Последовательность обработки поверхностей определяется следующими соображениями: сначала обрабатывают поверхности, служащие базами в дальнейших операциях, а также – менее точные поверхности; последующие операции должны уменьшать погрешности предшествующих; отверстия в заготовках валов значительной длины обрабатывают прежде, чем наружные поверхности.

Последовательность обработки также зависит от **характера размерной связи и погрешности взаимного расположения поверхностей**.

Характер размерной связи определяется системой простановки линейных координирующих размеров. Различают три системы простановки размеров - координатную, цепную и смешанную (рисунок 4).



а —координатная; б—цепная; в—комбинированная

Рисунок 4 – Схемы простановки размеров

В координатной системе положение всех поверхностей данного направления координируют относительно одной поверхности. При такой системе первой нужно обрабатывать поверхность, от которой проставлены все размеры. Последовательность обработки остальных поверхностей может быть любой. Если же начать обработку с какой-либо другой поверхности, то придется произвести пересчёт размеров и на некоторые из операционных размеров принять более жесткие допуски.

В цепной системе размеры проставляются непрерывно один за другим. Обработку можно начинать с любой поверхности, а остальные поверхности должны обрабатываться в определённой последовательности. Например, если первой обрабатывается поверхность 2, то остальные в последовательности 3-4-5-6-7-1; если поверхность 7, то остальные в последовательности 6-5-4-3-2-1.

При смешанной (комбинированной) системе правила выбора последовательности обработки также будут комбинированными- для координатной и для цепной систем.

7.3 Выбор технологических баз

Выбор должен производиться на основе **принципа совмещения баз**.

Для технолога этот принцип заключается в совмещении **исходной** и **конструкторской** баз. **Для конструктора приспособлений** - в совмещении **установочной** и **исходной** баз.

При выборе баз необходимо соблюдать следующие рекомендации:

1. На операциях окончательной обработки необходимо совмещать **исходные** и **конструкторские** базы (**ИБ = КБ**).

Это позволяет выдерживать размеры и технические требования **непосредственно** (с заданной по чертежу точностью). При нарушении данного правила приводит к необходимости пересчёта размеров и ужесточения допусков по сравнению с чертёжными.

2. Необходимо совмещать **установочную** и **исходную** базы (**УБ = ИБ**), что позволяет использовать способ автоматического получения размеров.

При этом нужно стремиться к тому, чтобы выбранные установочные базы были **опорными**, т.к. использование проверочных баз требует дополни-

тельных затрат времени на выверку и затрудняет автоматизацию процесса обработки. Точность, форма и размеры установочной базы должны обеспечивать необходимую точность установки, устойчивость и минимальные деформации заготовки под действием сил закрепления и резания.

За установочные базы необходимо принимать такие поверхности, используя которые можно обработать наибольшее количество поверхностей, т.к. смена баз вызывает дополнительные погрешности.

3. В качестве **черновых** (установочных и исходных) баз следует выбирать поверхности, остающиеся необработанными и у готовой детали.

Если у детали обрабатываются **все поверхности**, то в качестве черновой базы следует выбирать поверхность, с **наиболее высокой точностью** (не рекомендуются поверхности, имеющие следы разъёма штампов и т.п.). Черновой базой можно пользоваться только один раз.

4. В качестве **измерительных баз** необходимо выбирать: на **окончательных операциях** - конструкторские базы, на **промежуточных операциях** - исходные.

7.4 Формирование операций и разделение технологического процесса на этапы

Проектируемый технологический процесс в зависимости от технологических и организационных особенностей может быть разделён на различное количество операций. При этом можно исходить из двух различных принципов: принципа **концентрации** и принципа **дифференциации** операций.

Принцип концентрации характеризуется стремлением сосредоточить в одной операции обработку возможно большего числа поверхностей. Предельном концентрации является выполнение всей обработки в одну операцию.

Преимущества концентрации:

1. Упрощается организация и планирование производства, т.к. учёт ведётся по операциям;
2. Сокращается номенклатура приспособлений, необходимых для установки и закрепления деталей;
3. Сокращается длительность производственного цикла, т.к. уменьшается время межоперационного пролёживания заготовок;
4. Появляется возможность использовать станки высокой производительности (многолезцовые, агрегатные, многошпиндельные и т. п.).
5. Уменьшается число установок заготовки, что весьма важно для достижения высокой точности взаимного расположения поверхностей.

Принцип дифференциации предусматривает разукрупнение обработки и упрощение каждой операции за счёт увеличения их числа.

Преимущества дифференциации:

1. План операций становится более простым, упрощаются приспособления, инструменты, наладка станков, уменьшается время на подготовку производства;
2. Дифференцированный процесс является более гибким, его легко перестраивать, что важно в условиях частой смены объектов производства;
3. Появляется больше возможностей для работы с наиболее выгодными

режимами резания в каждом переходе.

Основным фактором, влияющим на выбор концентрации или дифференциации, является **тип производства**. В условиях единичного и мелкосерийного производства требование упрощения планирования и учёта является основным. Поэтому наиболее рациональным оказывается построение плана обработки по принципу концентрации с использованием универсального оборудования и рабочих высокой квалификации.

По мере увеличения серийности, открываются **два пути** совершенствования технологического процесса:

1. Путь дифференциации операций.

2. Путь совершенствования самих концентрированных операций - предполагает применение высокопроизводительных станков, работающих по автоматическому циклу (например, обрабатывающих центров).

Проектируемый технологический процесс делится на этапы, объединяющие однородные операции: черновые, чистовые, окончательные и др. Деление на этапы объясняется следующими обстоятельствами:

1. При обработке каждой поверхности нельзя избежать некоторого искажения ранее обработанных поверхностей. Если какую-либо поверхность высокой точности обработать сразу же окончательно, то при обработке других поверхностей, в результате перераспределения внутренних напряжений, она потеряет свою точность.

2. При наличии термообработки отделение чистовой обработки от черновой или окончательной от предварительной становится обязательным.

3. Разделение на этапы позволяет рационально использовать оборудование (для черновой обработки используются мощные жесткие станки, для чистовой менее мощные, но более точные станки).

7.5 Разработка технических требований на операции

Для того чтобы обеспечить технические требования рабочего чертежа необходимо назначать технические требования на промежуточные операции технологического процесса.

Назначение операционных допусков на неточность формы и расположения поверхностей осуществляется аналогично задачам назначения допусков на операционные размеры. Методика определения величины этих допусков зависит от характера операции.

Для операций черновой обработки значения допусков определяются из условия их соответствия средне-экономической точности установки заготовок в приспособления.

Для операций окончательной обработки значения допусков определяются из условия обеспечения соответствующих параметров указанных в чертеже.

Для назначения допусков, с помощью размерных цепей, выявляются операции, влияющие на точность взаимного расположения поверхностей. Допуски на технические требования назначаются из условия, что допуск на расположение поверхностей, указанный в чертеже, должен быть больше или равен сумме операционных погрешностей (допусков) взаимного расположения.

7.6 Выбор оборудования

Основными факторами, влияющими на выбор оборудования, являются: конфигурация и размеры детали; требуемая точность обработки; объём выпуска изделий, вид заготовки.

С технологической точки зрения станки разделяются на четыре группы

1. Станки общего назначения (универсальные) - токарные, сверлильные, фрезерные и т. п.

2. Станки общего назначения с повышенной производительностью. Они менее универсальны, но обеспечивают более высокую производительность (токарно-револьверные, многорезцовые автоматы и т. п.).

3. Станки определенного назначения - предназначены для выполнения операций одного наименования (зуборезные, резьбофрезерные и т.п.)

4. Специальные станки- предназначены для выполнения только какой-либо одной операции обработки (ЭХО лопаток). Проектируются и строятся по отдельному заказу.

Выбор оборудования той или иной группы производится на основании:

1. Заданной программы выпуска;
2. Соответствия рабочей зоны станка габаритным размерам детали;
3. Точностных возможностей станка;
4. Соответствия мощности, жесткости, диапазонов скоростей и подач.

7.7 Экономический анализ вариантов выполнения операций

Для оценки эффективности технологических процессов или отдельных операций проводятся расчёты производительности, себестоимости или эффективности капитальных вложений.

Сравнение вариантов по производительности проводится на основе минимизации штучно-калькуляционного времени выполнения операций.

Сравнение вариантов по себестоимости проводится на основе минимизации технологической себестоимости выполнения операций.

Сравнение по экономической эффективности капитальных вложений проводится в случае, когда предполагается приобретение дорогостоящего специального оборудования.

При выборе наиболее эффективного варианта выполнения операций в основном используют сравнение по **технологической себестоимости**.

7.8 Оформление технологической документации

Разработка технологической документации, а также формы применяемых документов определяются стандартами ЕСТД.

При разработке технологического процесса основными документами являются **маршрутная карта** и **комплект технологических карт**.

Маршрутная карта содержит описание технологического по всем операциям в технологической последовательности с указанием оборудования, оснастки, материальных и трудовых нормативов.

Операционная карта содержит описание технологической операции с

указанием переходов, режимов обработки и средств технологического оснащения.

В операционной карте выполняется эскиз, на котором изображается заготовка в рабочем положении с обязательным указанием технологических баз. Обрабатываемые поверхности выделяются жирными линиями, проставляются операционные размеры, шероховатость, технические требования.

8 Автоматизация проектирования технологических процессов (АПТП)

АПТП на базе ЭВМ ускоряет разработку ТП и повышает качество проектирования, освобождая технологов от рутинной работы и делая их труд творческим.

АПТП позволяет на основе анализа и сравнения вариантов ТП и отдельных операций сформировать оптимальный вариант обработки заготовок.

Составными частями АПТП являются автоматизированные системы проектирования технологического процесса заготовок, механообработки и сборки.

САПР ТП механообработки, в свою очередь, содержит ряд подсистем по решению отдельных задач проектирования: разработка маршрутной технологии, операционной технологии, расчет режимов резания, расчет операционных размеров, расчет трудоемкости и др.

Наиболее гибкими являются универсальные системы АПТП, основанные на классификации элементарных поверхностей деталей. В этих системах имеются:

- классификатор поверхностей;
- комплект формализованных языков для описания конфигурации деталей и структуры технологического процесса;
- банк типовых схем (маршрутов обработки) поверхностей в нескольких вариантах (с учетом габаритов, точности, шероховатости, серийности производства);
- банк постоянной информации (расчетные уравнения, нормативы для выбора припусков, допусков, станков, инструментов, режимов обработки, трудовых затрат и др.);
- системы кодирования постоянной и переменной информации, формы входной и выходной документации;
- управляющие алгоритмы;
- программа для ЭВМ на программоносителе.

АПТП может реализовываться и в диалоговом режиме и быть полностью автоматическим при наличии алгоритмов поиска оптимальных технологических решений.

ТЕМА 6: ВОПРОСЫ ЭКОНОМИКИ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

1 Нормирование и норма времени

Нормирование – это работа, связанная с определением трудоёмкости выполнения технологической операции с целью определить суммарную трудоёмкость технологического процесса и ряд других организационно-экономических показателей.

Технической нормой времени называют рабочее время, затрагиваемое на выполнение операции в определенных организационно-технических условиях при эффективном использовании средств производства и опыта новаторов.

Различают нормы штучного $t_{шт}$ и штучно-калькуляционного $t_{шт-к}$ времени. Первая норма определяет время на обработке одной заготовки, когда рабочий занят только выполнением операции. Если же рабочий занимается ещё наладкой и настройкой станка, то в нормировании фигурирует норма $t_{шт-к}$.

Состав $t_{шт}$ таков $t_{шт} = t_0 + t_b + t_{об} + t_{п}$,

где t_0 – основное (технологическое) время;

t_b – время на выполнение вспомогательных переходов;

$t_{об}$ – время обслуживания рабочего места;

$t_{п}$ – время перерывов.

Время t_0 затрагивается непосредственно на обработку заготовки (или сборку СЕ и изделий). Оно может быть машинным, машинно-ручным и ручным.

Вспомогательное время t_b – учитывает затраты времени, сопровождающего основную работу и её обеспечение. Это время на установку, снятие заготовки, управления станком, измерения.

Совокупность t_0 и t_b называется оперативным $t_{оп}$ временем

$$t_{оп} = t_0 + t_b.$$

Время $t_{об}$ состоит из времени технического обслуживания (смена инструмента, регулирование станка и инструмента, уборка стружки и др.) и времени $t_{оо}$ – организационного обслуживания (подготовка к началу работы, уборка станка в конце работы). Время $t_{то}$ исчисляют в процентах к t_0 , а время $t_{оо}$ – в процентах $t_{оп}$. Также в процентах от $t_{оп}$ определяют время на перерывы.

Упрощенный расчёт $t_{шт}$ ведут по такой зависимости:

$$t_{шт} = t_{оп} \left[1 + \left(\frac{\alpha + \beta + \gamma}{100} \right) \right],$$

где α, β, γ – коэффициенты, определяющие в процентах величины $t_{то}$, $t_{оо}$ и $t_{п}$ соответственно. Обычно принимается $\alpha = 2...10\%$, $\beta = 1...8\%$, $\gamma = 1...5\%$.

В условиях единичного и серийного производства, когда рабочий занят наладкой станка для выполнения операции и самой операцией используют $t_{шт-к}$.

$$t_{шт-к} = t_{шт} + T_{пз} / n,$$

где $T_{пз}$ – подготовительно-заключительное время, расходуемое на наладку;

n – размер партии заготовок, подлежащих обработке в данной операции.

При планировании работы используют норму выработки

$$N_B = T_{см} / t_{шт} \text{ или } N_B = T_{см} / t_{шт-к},$$

где $T_{см}$ – длительность рабочей смены.

Данными технико-экономическими показателями технологического процесса являются трудоёмкость и станкоёмкость.

Первая величина измеряется в человеко-часах, затрачиваемых на единицу продукции, а вторая – время работы оборудования в станко-часах, необходимое для изготовления одной детали. По трудоёмкости рассчитывается количество исполнителей, а по станкоёмкости количество потребных станков.

2 Экономическое обоснование вариантов выполнения операции

Большинство операций технологического процесса можно выполнить, применяя разные методы обработки (долбление шлиц – протачивание шлиц, зубофрезерование и зубодолбление, точение резьбы и резьбофрезерование и т.д.). Выбор рационального варианта может быть произведен различными путями:

- сравнение вариантов по трудоёмкости;
- сравнение по технологической себестоимости;
- сравнение по капитальным вложениям.

2.1 Сравнение вариантов операций по трудоёмкости

Это сравнение проводят по величине $t_{шт-к}$, а из сравниваемых вариантов выбирают вариант с меньшим значением $t_{шт-к}$.

Пусть затраты времени $T_{п1}$ на обработку партии заготовок по первому варианту составляют $T_{п1} = t_{шт-к}N_0 = t_{шт1}N_0 + T_{пз1}$, а затраты времени по второму варианту $T_{п2} = t_{шт-к}N_0 + T_{пз2}$. Здесь $t_{шт1}$ и $t_{шт2}$ – штучное время на операцию в вариантах 1 и 2 соответственно;

N_0 – размер критической программы выпуска деталей, при N_0 трудоёмкости обоих вариантов одинаковы;

$T_{пз1}$, $T_{пз2}$ – подготовительно-заключительное время по вариантам 1 и 2. Приравняв T_1 и T_2 и разрешая уравнения относительно N_0 , получим

$$N_0 = \frac{T_{п2} - T_{п1}}{t_{шт1} - t_{шт2}}.$$

Графическая интерпретация этого уравнения – на рисунке 1.

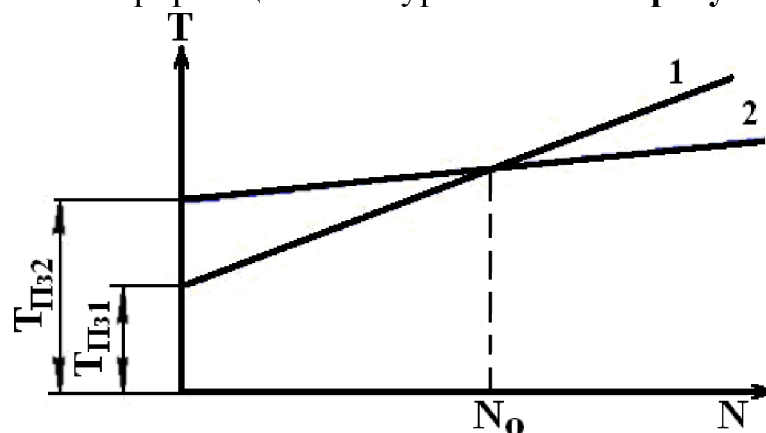


Рисунок 1 – График сравнения вариантов операций по трудоёмкости

Из графика видно, что при $N < N_0$ производительнее (предпочтительнее) вариант операции 1, а при $N > N_0$ – вариант 2.

По этой методике можно сравнивать не только два, но и большее количество вариантов.

Подчеркнем, однако, что сравнения по трудоёмкости не учитывает затрат, связанных с реализацией сравниваемых методов обработки. Этого недостатка лишено сравнение вариантов по технологической себестоимости.

2.2 Сравнение вариантов операций по технологической себестоимости

Технологической называют себестоимость C_T , учитывающую только стоимость выполнения операций. Эта себестоимость учитывает следующие затраты на операцию:

$$C_T = M + Z + Z_n + O_a + O_p + П + И_p + И_m + Э + A_{пл} + M_{всп},$$

где M – расходы на материал, учитывающие стоимость заготовки за вычетом стоимости отходов (стружки и др.);

Z – зарплата производственных рабочих;

Z_n – Зарплата наладчиков оборудования;

O_a – расходы на амортизацию оборудования;

O_p – расходы на ремонт оборудования;

$П$ – расходы на амортизацию приспособлений;

$И_p$ – расходы на эксплуатацию режущих инструментов;

$И_m$ – расходы на эксплуатацию мерительных инструментов;

$Э$ – затраты на силовую электроэнергию, идущую на выполнение операций;

$A_{пл}$ – затраты на амортизацию, ремонт, отопление, освещение, уборку производственного помещения;

$M_{всп}$ – затраты на вспомогательные материалы.

Необходимо подчеркнуть, что все статьи указанных затрат рассчитываются по строгим зависимостям, приводимым в специальных источниках, а также затраты как O_a , O_p , $П$, $И_p$ определяются отдельно для универсального и специального оборудования, приспособлений и инструментов.

Для определения C_T используются также и нормативный метод расчета, когда указанные статьи затрат определяются по нормативным таблицам, будучи отнесены к часу или минуте работы станка и инструментов.

Когда нужно определить границы эффективности сравниваемых вариантов выполнения операции, их технологическая себестоимость с учётом программы выпуска представляется (по вариантам 1 и 2) следующим образом:

$$C_{T1} = A_1 N_0 + B_1, \quad C_{T2} = A_2 N_0 + B_2,$$

где N_0 – размер критической программы, при которой оба варианта равноценны по C_T .

A_1, A_2 – текущие (переменные, зависящие от программы, отнесенные к одной детали) расходы. Таковыми являются затраты по статьям $M, Z, Э, A_{пл}, M_{всп}$ и затраты, идущие на использование универсального оборудования, приспособлений, инструментов;

B_1, B_2 – затраты, связанные с использованием специального оборудования и оснащения. Они не зависят от программы выпуска деталей. Эти расходы – единовременные.

Решая совместно оба приведенных уравнения, получим:

$$N_0 = \frac{B_1 - B_2}{A_1 - A_2}$$

Графическая интерпретация этого уравнения – на **рисунке 2**.

Сопоставляя величину N_0 с фактически выполняемой программой выпуска N_1 и N_2 по вариантам, заключаем, что при $N_i < N_0$ выгоднее 1 вариант, а при $N_i > N_0$ – 2 вариант.

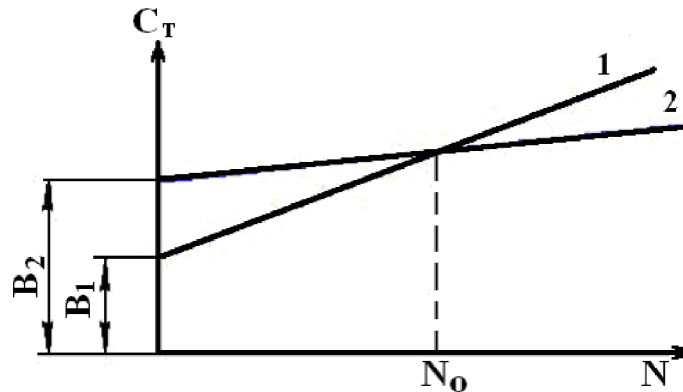


Рисунок 2 – График сравнения вариантов операций по себестоимости

2.3 Оценка экономической эффективности дополнительных капитальных вложений

Такая оценка необходима в случае, когда по одному из вариантов технологического процесса или по обоим планируется приобретение дорогого специального оборудования. Сравнение по трудоёмкости и даже по себестоимости может оказаться несостоятельным, указывая на более дорогостоящий вариант. Целесообразность дополнительных затрат устанавливается по коэффициенту E – экономической эффективности капитальных вложений.

$$E = \frac{C_1 - C_2}{K_2 - K_1},$$

где C_1 и C_2 – себестоимости годового выпуска деталей по вариантам технологического процесса.

K_1 и K_2 – капитальные затраты по вариантам. Здесь K_2 – дополнительные капвложения на новое оборудование, более дорогое.

Коэффициент E – есть годовая экономия на себестоимости изготовления деталей на новом оборудовании и оснащении, приходящимся на 1 рубль капвложений. Вычисленное значение E сопоставляется с нормативным $E_n = 0,25$ руб/год на рубль капвложений. Эти вложения будут справедливы, если $E > E_n$.

Другим показателем эффективности капвложений является срок окупаемости $T_{ок}$ этих затрат

$$T_{ок} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2} = \frac{1}{E}$$

Для машиностроения $T_{ок}=1/4=0,25$, что соответствует четырем годам, за которые капиталовложения будут оправданы (окупятся).

Лекция 1

Анализ существующей технологии изготовления рабочих лопаток КВД на предприятиях отрасли

Большое разнообразие конструкций и материалов, а также способов получения заготовок определяет разнообразие технологических процессов и специализированного оборудования для механической обработки лопаток компрессора.

Институтами отрасли совместно с промышленными предприятиями выполнен большой объем работ по разработке новых прогрессивных технологических процессов и созданию специализированного оборудования. Благодаря профилированию исходных заготовок прокаткой, электровысадкой, горячим вальцеванием и выдавливанием, а также окончательному формоизменению штамповкой на гидропрессах в изотермических условиях, на винтовых прессах, высокоскоростных молотах, холодным вальцеванием стало возможным изготавливать большую номенклатуру заготовок лопаток с уменьшенными припусками на размерную механическую обработку пера.

Среди многообразных конструкций выделяются группы лопаток, сходных по конфигурации, обрабатываемости, материалам, требованиям, предъявляемым к точности, качеству и сравнительно мало отличающихся по габаритным размерам.

Следует отметить, что сходные лопатки, как правило, на разных заводах изготавливаются разными методами, с помощью различных средств, значительно различаются по технико-экономическим показателям (по трудоемкости, технологической себестоимости, приведенным затратам) и технологии изготовления. Это существенный недостаток, он должен устраняться на базе типизации технологических процессов, при которой сходные по своим конструктивно-технологическим характеристикам лопатки следует обрабатывать с помощью единого процесса, обеспечивающего лучшие технико-экономические показатели. Однако это требует определенных капитальных вложений.

Конструктивно - технологический диапазон лопаток компрессора определяется с использованием следующих основных конструктивно - технологических признаков лопаток:

- конструктивных особенностей пера и хвостовика;
- длины пера;
- припусков и допусков на обработку пера;
- способов окончательной деформации;
- определяющих операций по обработке пера и хвостовика.

С учетом конструктивно-технологических особенностей выделены три размерные группы лопаток: с высотой до 120 мм, 120...250 мм, 250...850мм (рисунок 1).

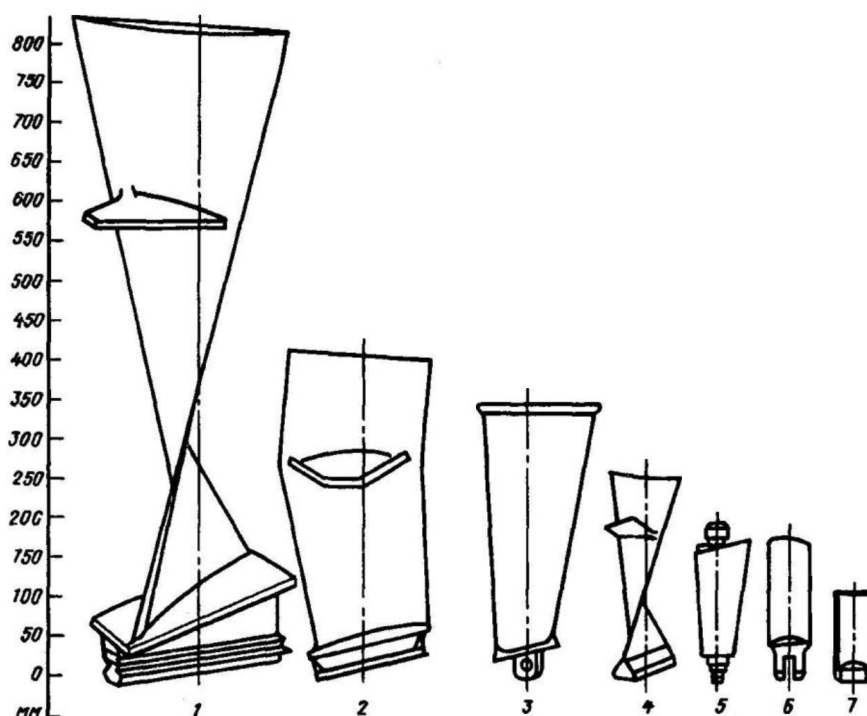


Рисунок 1 – Лопатки компрессора (1...7 –размерные группы лопаток)

С учетом определяющих операций по обработке пера, типов хвостовиков, а также передового опыта предприятий отрасли и перспективных направлений совершенствования технологии производства лопаток компрессора можно выделить следующие технологические группы лопаток .

Высота пера до 120 мм, один хвостовик типа "ласточкин хвост". Припуск по перу 0,2...0,6 мм. Обработка профиля хвостовика протягиванием или точением для кольцевых хвостовиков.

Используются три технологические схемы обработки пера с определяющими операциями: вальцевание; шлифование; ЭХО.

Для этой группы лопаток в настоящее время прорабатываются две перспективные технологические схемы: с использованием заготовки лопаток с припуском по перу под безразмерную обработку; с применением круговой ЭХО пера из катаной калиброванной полосы.

Перечисленные выше определяющие операции по обработке основной части пера лопаток компрессора выполняются на специализированном обрабатывающем оборудовании различных моделей, зависящих от габаритных размеров лопаток. При установке лопаток в станочные приспособления на этих операциях базовыми поверхностями являются, как правило (исключая лопатки, обрабатываемые вальцеванием), поверхности окончательно обработанного хвостовика и технологической прибыли для лопаток с одним хвостовиком или двух хвостовиков.

На качество лопаток, особенно изготавливаемых из заготовок с малыми припусками, большое влияние оказывает выбор технологических баз, обеспечивающих правильное распределение припуска по поверхностям профильной части пера. Обычно назначаются следующие черновые технологические базы:

- две точки в комлевом и одна в торцевом сечениях пера со стороны спинки, ориентирующие перо лопатки в поперечном направлении. Для лопаток с двумя хвостовиками эти точки выбираются в прикомлевых сечениях;
- по одной точке на входном торце хвостовика и на торце технологической прибыли, ориентирующих перо лопатки, в продольном направлении. Для лопаток с двумя хвостовиками - две точки на входной кромке;
- одна точка на подошве хвостовика или точка на тракторной поверхности полки, ориентирующая перо лопатки в осевом направлении.

Правильный выбор черновых технологических баз должен обеспечивать не только получение требуемых геометрических размеров лопатки, но и ее высокое качество, так как гарантирует удаление дефектных поверхностных слоев, устраняет возможность перегрева материала лопатки при электрохи-

мической обработке пера, обеспечивает получение требуемого качества обработки благодаря надежному креплению заготовки.

За основную технологическую базу лопатки принимается хвостовик или хвостовики для лопаток с двумя хвостовиками, являющиеся одновременно конструктивной базой. От хвостовика и технологического центра или от двух хвостовиков (для лопаток с двумя хвостовиками) производится окончательная обработка пера. Обработка хвостовика или хвостовиков осуществляется от черновых технологических баз.

При механической обработке профиля пера лопаток с одним хвостовиком используется технологический центр на торце технологической прибыли. Если центровое отверстие при последующих операциях не несет силовой нагрузки, то такая база выполняется в виде наружного центра.

Для наиболее полного использования принципа единства баз необходимо не только стремиться использовать одни и те же поверхности в качестве технологических баз на различных операциях, но, что не менее важно, и одни и те же участки (точки) поверхностей. Для этого все установочные элементы приспособлений и контрольных приборов, используемых на различных операциях, должны компоноваться по единой схеме, на одинаковых расстояниях и быть по возможности одинаковых размеров. Последнее положение наиболее существенно при обработке лопаток с малыми припусками по перу.

При износе установочных элементов приспособлений лопатки по профилю пера устанавливаются на площадки, а не на точки. Кроме того, при закреплении лопатки по поверхности пера создаются локальные очаги контактных напряжений, поэтому появилась тенденция к использованию переходных баз: лопатки устанавливают в кассеты, заливают в брикет.

1 Обработка хвостовиков лопаток компрессора

Как было отмечено ранее, наиболее распространенным типом конструкций хвостовиков как рабочих лопаток, так и лопаток статора компрессора является "ласточкин хвост" (**рисунок 2**). При обработке таких хвостовиков наиболее часто используются следующие технологические процессы :

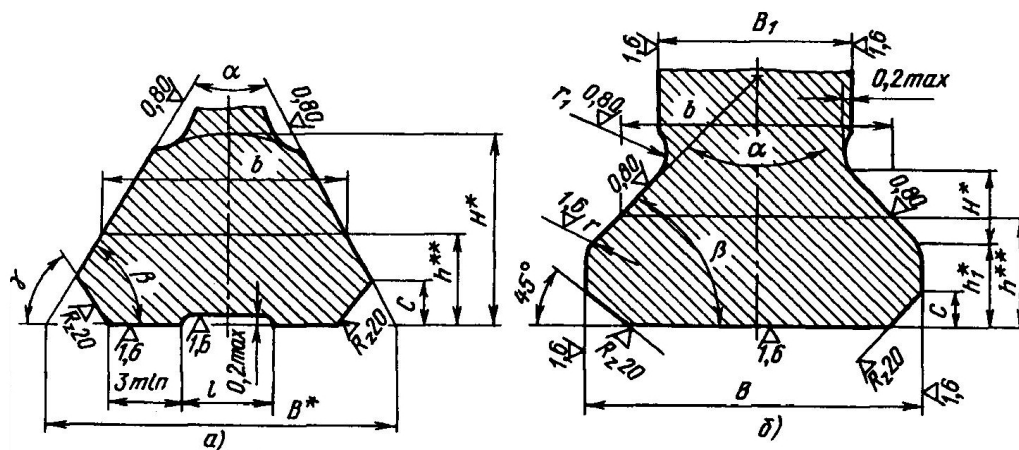


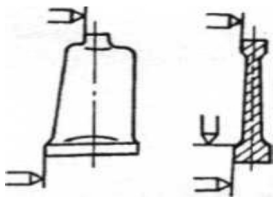
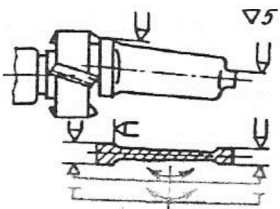
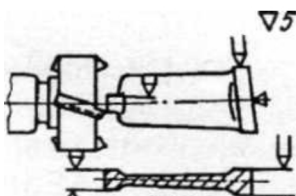
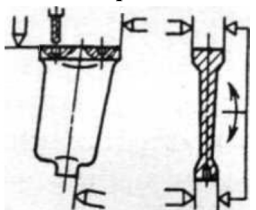
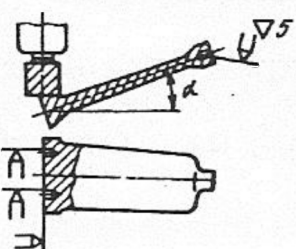
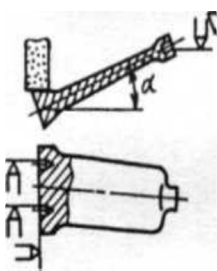
Рисунок 2 – Хвостовики лопаток «ласточкин хвост»

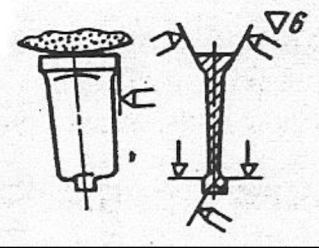
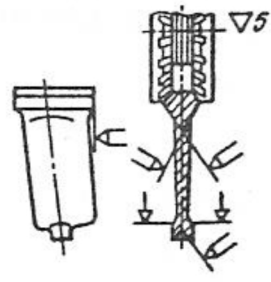
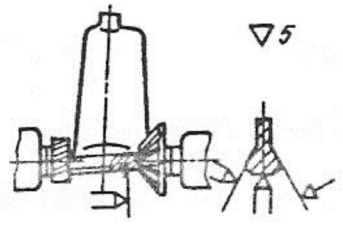
1. Обработка хвостовиков на универсальном оборудовании. Эта технология возникла в первые годы производства газотурбинных двигателей. Её характерной особенностью является применение универсального металло-режущего оборудования и специализированной технологической оснастки. Такая технология или отдельные операции могут использоваться при изготовлении опытной партии лопаток. Последовательность операций, оборудование, инструмент и режимы резания приведены в **таблице 1**.

2. Механическая обработка хвостовиков лопаток (длиной до 150 мм) на автоматических линиях типа АЛЗЛ-2. Такая технология используется отдельными заводами с достаточно большой производственной программой. Впервые она была разработана и освоена на ММПП "Салют".

Технологический процесс обработки хвостовика состоит из шести отдельных операций, осуществляемых при одной установке заготовки лопатки в приспособление. Предварительная обработка основания, боковой поверхности и фасок со стороны спинки (корыта), а также обработка торцов хвостовика и бобышки выполняются фрезерными головками. Окончательная обработка профиля хвостовика производится протягиванием.

Для всех операций, выполняемых на автоматической линии, установлены режимы резания, определяемые из расчета, что стойкость режущего инструмента не менее 8 ч.

Операция, база, эскиз	Оборудование	Инструмент и режим резания
Установка и съем детали 	-	-
Фрезерование основания 	Горизонтально-фрезерный станок	Торцовая фреза Материал резцов ВК8 Скорость резания $v = 180 \text{ м/мин}$ Скорость подачи $S = 374 \text{ мм/мин}$
Фрезерование торца бобышки 	То же	То же
Обработка технологических отверстий 	Вертикально-сверлильный станок	Сверло P18.P9K5; зенкер P18.P9K5; зенковка P9K5 $v = 22 \text{ м/мин};$ $S = 110 \text{ мм/мин}$
Фрезерование боковых поверхностей 	Вертикально-фрезерный станок	Торцовая фреза Материал P18 $v = 45 \text{ м/мин};$ $S = 190 \text{ мм/мин}$
Шлифование боковых поверхностей 	Плоскошлифовальный станок	Шлифовальный круг ПП300х16х32ЭБ25СМ1/СМ2 $v = 25...30 \text{ м/с}$
Шлифование основания	То же	Шлифовальный круг ПП300х16х32ЭБ25СМ1/СМ2 $v = 25...30 \text{ м/с};$

Операция, база, эскиз	Оборудование	Инструмент и режим резания
		число двойных ходов $n = 3 \dots 6$ дв.х/мин
Фрезерование фасок 	Горизонтально-фрезерный станок	Блок из двух дисковых двусторонних фрез Материал Р18Ф2М, Р9К5 $v = 86$ м/мин; $S = 200$ мм/мин
Фрезерование торцов 	Продольно-фрезерный станок АПФ-2	Торцовые фрезы Материал Р18Ф2М, Р9К5 $v = 38$ м/мин; $S = 170$ мм/мин

Производственная эксплуатация автоматической линии показала, что она обеспечивает стабильное качество изготовления хвостовиков.

Линия, включающая шесть позиционных станков, скомпонована прямолинейно, имеет штанговый транспортер, передающий обрабатываемую деталь с кассетой по рабочим позициям. После выполнения всех операций кассета с обработанной лопаткой поступает на стол, который опускается, и кассета передается на транспортер возврата. С помощью этого транспортера кассеты приходят на передний стол, поднимающий их в исходное положение. Лопатка зажимается в кассете и освобождается после обработки при помощи гидравлического ключа.

К недостаткам рассмотренного технологического процесса следует отнести сложную переналадку автоматической линии и, как следствие, нерентабельность ее эксплуатации при малых производственных программах.

3. Обработка хвостовиков типа "ласточкин хвост" на специальном горизонтально-протяжном полуавтомате непрерывного действия модели МП-57А (производство Минского завода протяжных станков) выполняется на ММПО "Красный Октябрь". Полуавтомат предназначен для обработки хвостовиков лопаток с высотой пера до 300 мм.

Технологический процесс обработки хвостовика на полуавтомате МП-57А состоит из двух операций: протягивание профиля хвостовика; протягивание торцов хвостовика, замковой прорези или уступа (при наличии их в конструкции хвостовика).

Недостатком данного технологического процесса являются невозможность переналадки полуавтомата и нерентабельность эксплуатации при малых производственных программах.

4. Обработка хвостовиков лопаток компрессора (типа "ласточкин хвост") на универсальных горизонтально - или вертикально-протяжных станках.

Наряду с высокой производительностью и хорошей стойкостью режущих кромок протягивание обеспечивает значительно большую точность и меньшую шероховатость обрабатываемой поверхности по сравнению с фрезерованием.

Во многих случаях протягивание заменяет шлифование и надежно обеспечивает обработку поверхностей с шероховатостью $Ra = 1,25$ мкм, в том числе деталей из жаропрочных сталей и сплавов.

В серийном производстве на большинстве заводов отрасли протягивание хвостовиков типа "ласточкин хвост" производится на универсальных горизонтально-протяжных станках. В зависимости от размеров лопаток и снимаемого припуска применяются станки моделей 7А510, 7Д520 и 7А540. Эти станки являются одинарными. Основной цикл работы - полуавтоматический.

На ММПП "Салют" разрабатывается технологический процесс обработки хвостовиков лопаток компрессора типа "ласточкин хвост" на высокоточном фрезерном станке с ЧПУ, который должен обеспечить необходимые

точность и шероховатость поверхностей. Этот процесс может быть эффективным при изготовлении небольших партий лопаток.

На станке будут обрабатываться хвостовики заготовок лопаток компрессора без припуска по перу, залитые в брикет легкоплавкого сплава. Унифицированный обрабатывающий инструмент (фрезы) и управляющие программы станка рассчитаны на обработку хвостовиков лопаток компрессора двенадцати наименований. В зависимости от положения обрабатываемой заготовки лопатки, залитой в брикет, система ЧПУ определит оптимальное расположение и будет внесена корректировка в управляющие программы. Концентрация операций на одном станке позволит снизить трудоемкость изготовления хвостовика в 1,5...2 раза за счет уменьшения вспомогательного времени.

2 Обработка пера лопаток

Перо лопатки представляет собой основную поверхность, определяющую аэродинамические свойства лопатки. Технологический процесс обработки пера должен обеспечивать получение поверхности, соответствующей требуемым техническим условиям по точности, и одновременно создание в поверхностном слое необходимых шероховатости поверхности, наклепа и остаточных напряжений. Разнообразие технологических процессов изготовления лопаток компрессора определяется использованием различных методов обработки пера и широкой номенклатурой специализированного оборудования, предназначенного для этой цели.

Наиболее освоены процессы обработки пера лопаток компрессора с высотой пера до 120 мм, 120...250 мм и 250...850 мм. Все эти процессы и используемое оборудование не позволяют механизировать обработку всей траекторной поверхности. Требуется ручная доработка профиля пера и сопряжений его с другими поверхностями (кромки, полки, косые участки, радиусы сопряжений) с целью обеспечения заданных точности и шероховатости поверхностей. При этом нарушения технологии, связанные с субъективными факторами, имеющими место при ручной обработке, могут приводить к дефектам типа прижогов, подповерхностных трещин и т.п., выявляемых в ме-

ханическом цехе, после стендовых испытаний и даже в эксплуатации. Механизация обработки пера лопатки позволяет не только снизить трудоемкость, но и обеспечить требуемые качество и надежность лопаток.

Рассмотрим основные технологические процессы и оборудование для обработки пера.

Предварительная размерная обработка трактовых поверхностей фрезерованием. Предварительная размерная обработка фрезерованием трактовых поверхностей заготовок лопаток компрессора, штампуемых с припуском по перу на специализированных станках различных моделей, в том числе на универсальных станках с ЧПУ, находит широкое применение на предприятиях отрасли.

Фрезерование пера лопаток выполняется с помощью специализированного оборудования. Его выбор зависит от габаритных размеров лопатки.

Раздельное фрезерование корыта и спинки лопаток продольными строчками осуществляется на гидрокопировальных и программных четырехшпиндельных горизонтально-фрезерных станках моделей 4ФПЛ, 4ФПЛ-ПР, 4ФПЛ400ПР. На станках 4ФПЛ и 4ФПЛ-ПР возможна обработка пера лопаток длиной до 150 мм, на станке 4ФПЛ400ПР - до 400 мм.

Одновременное фрезерование спинки и корыта лопаток выполняется на станках КФП-3, КА-65, КА-1100, 4ФСЛ-8П. На станках КФП-3 и КА-65 одновременно обрабатываются две лопатки; на станках КА-1100 и 4ФСЛ-8П - по одной длиной до 1000 мм.

Изготовление лопаток из труднообрабатываемых материалов предопределяет необходимость применения новых, более совершенных материалов для режущего инструмента, используемого при их обработке. Наиболее широко применяются стали Р9К5, Р9К10, Р10К5Ф5 и Р18К5Ф2. Эти быстрорежущие стали обеспечивают повышение стойкости инструмента в 2...3 раза по сравнению с обычно применяемой сталью Р18. Инструмент из твердых сплавов ВК8Т и ВКБКС при обработке деталей из жаропрочных и титановых сплавов обладает в 2...3 раза большей стойкостью по сравнению с инструментом из сплава ВК8. Разработан новый тип инструментального материала -

дисперсионно-твердеющие сплавы. Применение этих сплавов, позволяет повысить стойкость инструмента в 4...5 раз.

Одним из путей снижения трудоемкости изготовления лопаток, повышения их качества и сокращения объема ручного труда является применение технологических процессов интегрированной обработки лопаток на станках с ЧПУ. В соответствии с отраслевой программой НИИД разработана гамма специальных фрезерных станков с ЧПУ, предназначенных для предварительной размерной обработки полного комплекса трактовых поверхностей лопаток компрессора:

- 4ФСЛ-150П-3 для обработки трактовых поверхностей одновременно трех лопаток длиной до 150 мм и шириной пера до 200 мм;
- 4ФСЛ-300П5-3 для обработки трактовых поверхностей одновременно трех лопаток длиной до 300 мм и шириной пера до 300 мм;
- 4ФСЛ-600П5-3 для обработки трактовых поверхностей одновременно трех лопаток длиной 600 мм и шириной пера 360 мм;
- 4ФСЛ-1000П5-5 - фрезерный пятикоординатный пятишпиндельный станок для обработки трактовых поверхностей одновременно пяти лопаток длиной до 1000 мм и шириной пера до 340 мм или трех лопаток с шириной пера до 400 мм.

Обработка выполняется методом кругового фрезерования торцевыми или дисковыми угловыми фрезами с выдерживанием оптимального угла между плоскостью вращения режущих кромок фрезы и плоскостью, касательной к обрабатываемой поверхности в мгновенной точке контакта. Этот угол колеблется в пределах 8...12°. Скорость резания равна 20...30 м/мин, подача - 0,05...0,1 мм на зуб. При фрезеровании кромок пера в целях ликвидации их надрывов подача уменьшается до 0,02 мм на зуб. Станки обеспечивают программное перемещение исполнительных органов по пяти формообразующим координатам.

Вальцевание профиля пера. Вальцевание пера лопаток выполняется консольно от окончательно обработанного хвостовика. На **рисунках 3, 4**

приведены схемы вальцевания лопаток, а на **рисунке 5** конструкции валков для вальцевания лопаток.

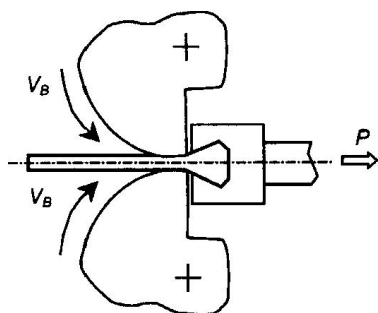


Рисунок 3 – Схема холодного вальцевания пера рабочей лопатки

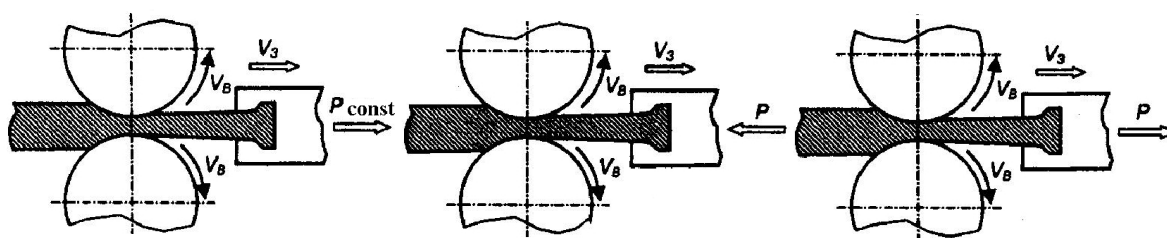


Рисунок 4 – Базовые схемы вальцевания

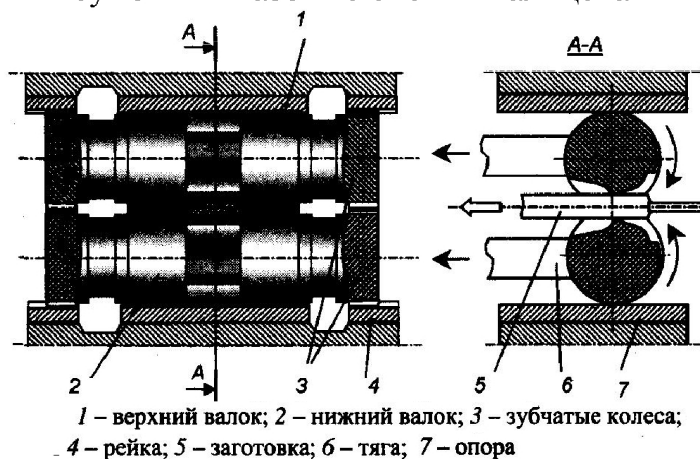


Рисунок 5 – Конструкции валков для вальцевания лопаток

Электрохимическая обработка. Электрохимическая размерная обработка (ЭХО) широко применяется для обработки пера лопаток компрессора. В основе процесса лежит принцип электролиза. Заготовка является анодом, а инструмент – катодом (**рисунк 6**).

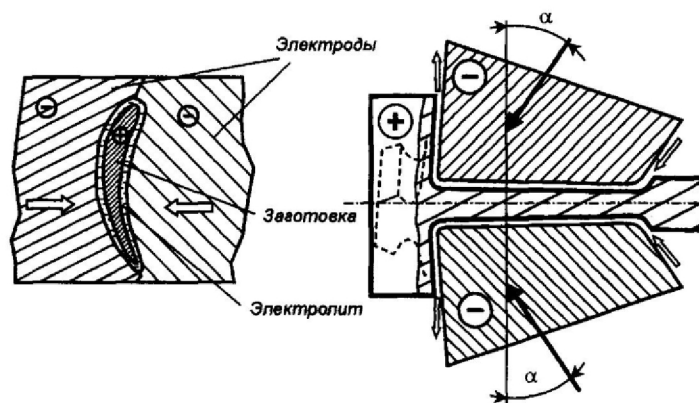


Рисунок 6 - Схема ЭХО

Обработка ведется при низких напряжениях тока. Поверхность инструмента является зеркальным отражением поверхности пера лопатки. Между заготовкой и инструментом прокачивается солевой электролит, который выносит продукты электролиза из рабочей зоны. Поскольку контакта между заготовкой и инструментом не существует, нет и износа инструмента.

Характерной особенностью ЭХО пера лопаток является то, что она не создает в поверхностном слое остаточных напряжений и наклепа. Вследствие избирательности процесса электрохимического растворения, которую не удастся в полной мере ликвидировать, происходит растравливание по границам зерен. Глубина измененного слоя зависит от обрабатываемого материала и условий обработки, но не превышает 0,03...0,05 мм. Этот измененный слой удаляется с помощью абразивной обработки на ленточных виброполировальных станках типа ЛВП-3 и объемной виброабразивной обработки на установках типа ВГМ-5.

Процесс импульсной ЭХО лопаток компрессора из титановых сплавов обеспечивает стабильность их геометрических размеров в пределах 0,03...0,05 мм при шероховатости поверхности $Ra = 0,20$ мкм без растравливания поверхности. Метод импульсной ЭХО можно использовать для объемного одноменного формирования всех элементов торцевой поверхности лопаток - круговой обработки (рисунок 7,8).

ЭХО
вре-
трак-
ра-



Рисунок 7- ЭХО лопатки

Рисунок 8 –Лопатки до и после ЭХО

Круговая обработка всех элементов трастовой поверхности лопатки осуществляется на конечной стадии формирования пера при сомкнутых электродах-инструментах. Это позволяет производить полную окончательную обработку поверхностей пера, включая радиусы переходов поверхностей пера к хвостовику, полку хвостовика и радиусы скругления входной и выходной кромок.

Для реализации импульсной ЭХО лопаток по круговой схеме необходимы высокоточный электрохимический станок, импульсный источник питания и система автоматического управления процессом обработки.

Шлифование пера лопаток компрессора как определяющая операция технологического процесса выполняется для всех трех выделенных размерных групп лопаток как один из вариантов обработки профиля пера. **Назначение операции** - окончательная размерная обработка пера, сложных поверхностей сопряжений пера с хвостовиками и полками, кромок пера, в том числе скругление кромок пера под дальнейшее полирование.

Ленточное шлифование пера лопаток. Основным методом окончательного формообразования сложных криволинейных трастовых поверхностей лопаток компрессора в большинстве существующих в промышленности технологических процессов является шлифование абразивной лентой (**рисунок 9**).

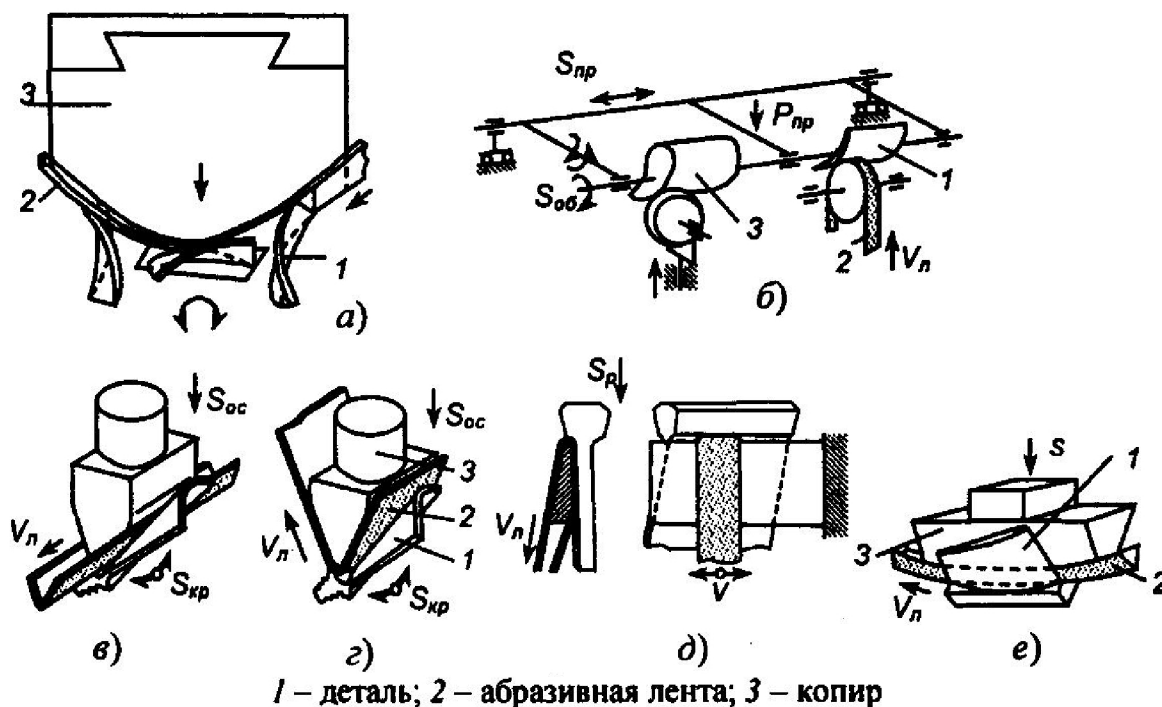


Рисунок 9 – Схемы ленточного шлифования

Применение в копировальных системах эластичного инструмента, каким являются абразивные ленты, вызвано необходимостью поддержания постоянства и соответствия геометрических форм и размеров копиров и режущих элементов. Существуют различные кинематические схемы методов обработки и соответствующее им оборудование для механизированного шлифования криволинейных поверхностей пера лопаток.

Полирование пера лопаток. Повышение качества поверхности пера лопаток - одно из основных направлений удовлетворения все возрастающих требований к прочностным свойствам лопаток газотурбинных двигателей.

В общей трудоемкости изготовления лопаток компрессора, особенно крупногабаритных, значительный объем занимают полировальные работы, связанные с обработкой сопряжений, кромок, доводкой и полированием профиля пера. Эти работы выполняются высококвалифицированными слесарями-полировщиками вручную на полировальных бабках. Ручное полирование оказывает вредное воздействие на рабочих, поскольку вибрация станка и обрабатываемого инструмента передается человеку. Обязательным условием работы на полировальных бабках является их оснащение вытяжной вентиляцией. Значительный объем ручных работ при производстве лопаток не только увеличивает трудоемкость их изготовления, но и не обеспечивает ста-

бильности выполнения технических требований чертежа. Ручная доработка и полирование пера лопаток в ряде случаев может приводить к прижогам, заполированию поверхностных дефектов и др. Поэтому чрезвычайно важным является выбор и использование в производстве рациональных способов окончательной обработки пера лопаток. Это в значительной степени определяет трудоемкость их изготовления и объем ручных доводочных и полировальных работ.

При производстве лопаток первостепенное значение имеет механизация полировальных работ, так как она обеспечивает не только снижение трудоемкости изготовления лопаток, но и повышение стабильности качества и ресурса работы.

Наиболее распространенный способ механизации процесса окончательной обработки пера лопаток - применение механического полирования (**рисунок 10**).

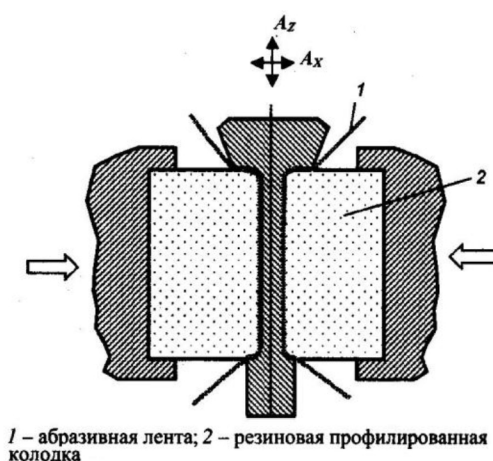


Рисунок 10 – Схема виброконтального полирования

Для этой операции создан ряд специализированных станков. Станки для полирования пера предназначены для обеспечения заданной шероховатости и сохранения точности его обработки, достигнутой на предыдущих операциях.

Рассмотрим технологический процесс изготовления лопаток ротора КВД на ОАО «Кузнецов».

Предварительно проведём **технологический анализ рабочих чертежей лопаток ротора КВД 10, 12, 15 ступеней.**

Так как конструктивно лопатки похожи (**рисунок 11**) и отличаются в основном геометрическими размерами, будем выполнять общий анализ с выделением особенностей каждой лопатки.

3 Назначение и условия работы

Лопатки ротора компрессора указанных ступеней является основным рабочим элементом, который, воздействуя на проходящий через компрессор воздух, осуществляет его сжатие. Они относятся к числу наиболее нагруженных деталей ГТД, определяющих его ресурс.

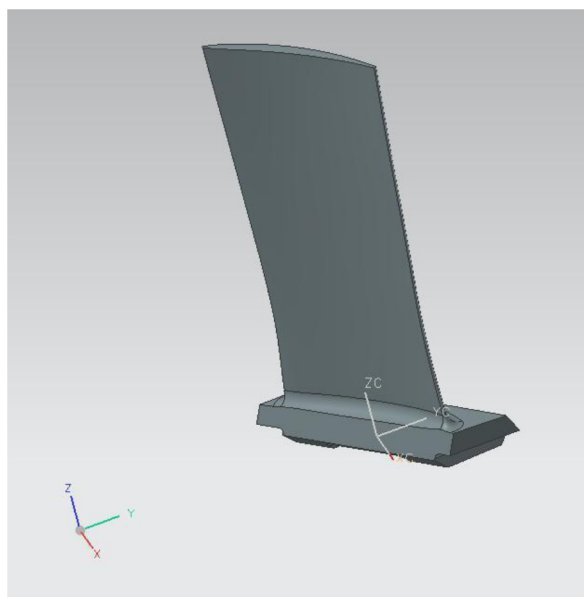


Рисунок 11–Лопатка компрессора

Профильная часть (перо лопатки) - кроме растяжения и изгиба от центробежных сил, изгиба и кручения от газового потока, испытывает тепловые нагрузки, а также переменные напряжения от вибрационных нагрузок, амплитуда и частота которых меняются в широких пределах. При работе двигателей на переходных режимах в кромках пера возникают напряжения, связанные с различной

величиной термического расширения тонких и утолщенных элементов пера. Условия работы пера осложняются действием пылевой эрозии и агрессивной газовой среды. В замке лопатки помимо циклических растягивающих напряжений возникают значительные контактные напряжения, которые могут вызвать локальные разрушения в зоне контакта. Тепловые нагрузки в хвостовике незначительны, по сравнению с профильной частью.

4 Конструкция и геометрические характеристики лопатки

В конструкции лопатки четко выделены два самостоятельных элемента - замок (хвостовик) и перо. На **рисунке 12** приведена нумерация основных поверхностей лопатки. Общая длина лопатки 10 ступени 58,8мм, 12 ступени 42,2мм, 15 ступени 30,4мм. Хвостовик лопатки выполнен по типу “ласточкин

хвост” (пов. 5) и ограничен плоскостями, расположенными под различными углами друг к другу.

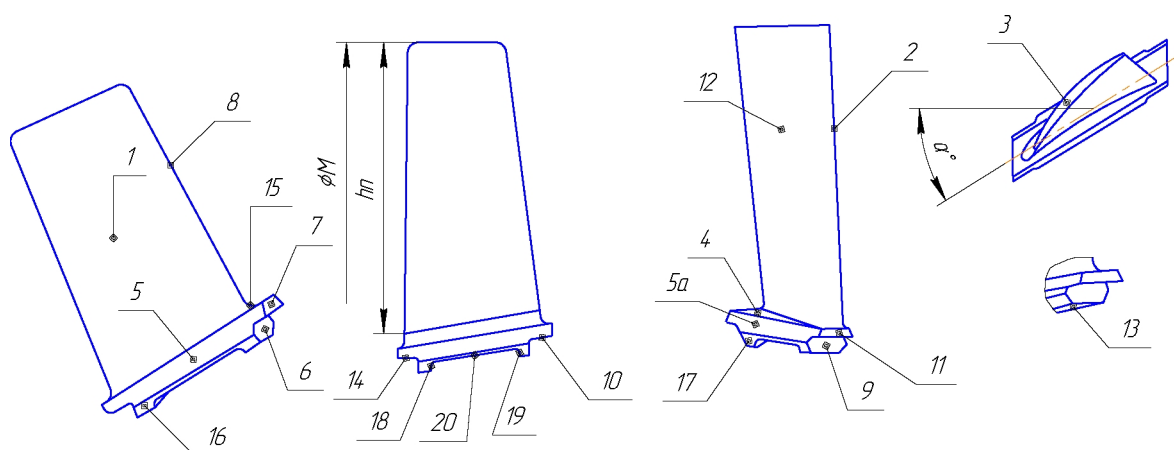


Рисунок 12 - Основные поверхности лопатки.

Перо лопатки имеет сложную пространственную форму с переменными профилями поперечных сечений по длине. Профиль пера задается координатами отдельных точек. Сечения повернуты относительно друг друга и образуют закрутку пера, составляющую угол $\alpha = 12^\circ 35'$ для лопатки 10 ступени, $\alpha = 10^\circ 37'$ для 12 ступени и $\alpha = 6^\circ 48'$ для 15 ступени. Перо имеет малую толщину ($C_{\max} = 2,47-2,84$ мм) и тонкие кромки (пов. 2 и 8), что сообщает детали низкую жесткость. Это обстоятельство обуславливает существенное снижение технологичности лопатки. Радиусы округления кромок постепенно уменьшаются к концу пера. Сопряжение между пером и хвостовиком образовано радиусными поверхностями. Со стороны выходной кромки на хвостовике выполнена радиусная выемка, а в средней части выполнен паз для облегчения лопатки. На лопатках 15 ступени со стороны выходной кромки имеется паз под «шип», а со стороны входной кромки выполнен специальный выступ—«шип».

Основной конструкторской базой лопатки служат боковые поверхности хвостовика 5 и 5а, связанные в расчетном сечении точным размером ($7,876 \pm 0,02$ -10 ступень; $6,81 \pm 0,02$ -12,15 ступени), расположенные под углом 40° (допуск $+9'$) друг к другу и под углом 70° (допуск $-12'$) к плоскости основания. Погрешность взаимного расположения боковых поверхностей по длине оговаривается следующими техническими требованиями:

- допуск на ширину хвостовика я не более 0,01мм;

- допуск плоскостности боковых поверхностей (пов.16 и 5) хвостовика 0,006мм (контроль по краске – по И01.1814, отпечаток краски должен быть равномерным не менее 75% площади поверхности; длина отдельных участков отпечатков не менее 10%; длина разрывов между ними не более 10%)).
- подошву хвостовика (поверхность 13) проверить по краске; прилегание краски должно быть равномерным не менее 70% на длине рабочей поверхности подошвы хвостовика.

Основные поверхности пера (корыто 1, спинка 12, кромки 2, 8) являются рабочими и выполняют определенное функциональное назначение. К точности геометрических параметров основных поверхностей пера, имеющих сложную форму, предъявляются высокие требования: допустимая погрешность профиля составляет 0,15мм, а разворот профилей сечений не должен превышать 8' от номинального положения.

Связь между основными (конструкторскими и рабочими) поверхностями регулируется техническими требованиями к допустимой величине смещения пера и хвостовика (не более 0,2 в направлении, перпендикулярном оси хвостовика, и не более 0,1 в направлении его оси). Допустимая погрешность смещения профиля составляет от номинального положения для сечений А₂-А₄ относительно середины хвостовика не более 0,5мм и для сечений А₅-А₇ не более 0,3мм.

К перу лопатки предъявляются также следующие требования:

- отклонение сечений лопаток от расчетных форм профилей не более $\begin{matrix} +0,1 \\ -0,05 \end{matrix}$ мм при плавном изменении отклонений вдоль линии профилей;
- входную и выходную кромки закруглить плавно изменяющимся по длине радиусом (смотреть план профилей) и заполировать, контроль по образцу;
- плавность входной и выходной кромок лопатки проверять шаблоном. Допускается в 2-х местах просвет не более 0,2мм, равномерно распределенный не менее, чем на 1/3 длины пера.
- плавность сопряжения поверхностей пера и хвостовика, чистоту обработки в этом месте, заправку радиусов передней и задней кромок, волнистость поверхности пера проверять по образцу.

Сложность геометрии основных поверхностей пера в сочетании с высокими требованиями к точности вызывает серьезные затруднения при обработке этой части лопатки. До настоящего времени велик объем ручных доводочных работ, снижающих стабильность параметров, характеризующих качество изготовления детали и экономичность. Проблемой является также механизация обработки кромок пера и перехода между пером и хвостовиком.

К качеству поверхностей лопатки предъявляют следующие требования: шероховатость профиля пера и радиусов сопряжения пера и замка $Ra = 0,32$ мкм, что предполагает операцию полирования; базовые боковые поверхности замка $Ra=1,25$ мкм (данное требование вводится для обеспечения точной посадки замка в диске ротора компрессора); торцы замка (пов.6,7,9,11) и боковые поверхности 10 и 17 - $Rz = 20$ мкм; подошва замка $Ra=2,5$ мкм.

Перо и радиус перехода к хвостовику подвергаются упрочнению микрошариками. При этом выполняется периодический контроль остаточных поверхностных напряжений пера (по МВ-861) и усталостной прочности (по МВ-867р.2).

Технологичность конструкции данной лопатки повышается за счёт следующих её особенностей:

- радиусы сопряжения профиля пера с хвостовиком достаточно велики ($2_{-0,3}$ мм), благодаря чему обеспечивается возможность механизированной обработки на станках типа ЛШ;
- кромки практически прямолинейны, что облегчает механизацию обработки;
- форма замка создает условия для обработки на проход, не затрудняет доступа для измерения обрабатываемых поверхностей, обеспечивает применение наиболее производительных методов его обработки.

5 Характеристика заготовки и материала детали

Материал лопаток с 11 по 15 ступени – ХН45МВТЮБР-ИД жаропрочная деформируемая хромоникелевая сталь аустенитного класса, подвергнутая электрошлаковому переплаву, обеспечивающему эффективную очистку от

сульфидов и оксидов. Химический состав стали приведён в таблице 2, а механические свойства в **таблицах 3, 4, 5.**

Таблица 2 - Химический состав стали ХН45МВТЮБР-ИД

C	Si	Mn	Cr	Ni	V	W	Mo	Fe	N	Nb	S	P
											не более	
0,13-0,18	≤0,6	≤0,6	11,5-13,0	1,5-2,0	0,18-0,30	0,65-1,0	1,35-1,65	основа	0,02-0,08	0,20-0,35	0,03	0,03

Таблица 3 - Механические свойства стали ХН45МВТЮБР-ИД

Вид полуфабриката	Состояние	t,°C	σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ_5	φ	a_n кГм/см ²	НВ, d мм
			кГ/мм ²		%			
Прутки	Термически обработанные	20	100	90	14	55	6	3,35-3,6

Таблица 4 - Механические свойства при различной температуре

t, °C	E	σ _B	σ _{0,2}	σ _{пл}	δ ₅	δ ₁₀	φ	a _n кГМ/см ²	НВ d мм
	кГ/мм ²				%				
20	20000	105	85	60	15	10	55	6	3.3-3.6
550	14500	80	55	35	15	8	65	14	-
600	12500	60	40	25	16	8	70	-	-
650	9500	45	35	18	20	12	75	16	-

Таблица 5 - Пределы длительной прочности, ползучести и выносливости

t, °C	σ_{100}	σ_{500}	$\sigma_{0,2/100}$	$\sigma_{0,2/500}$	σ_{-1}	σ^H_{-1}
					на базе 10^7 циклов	
	кГ/мм^2					
20	-	-	-	-	54	30
550	46	40	30	23	-	-
600	33	27	18	13	34	19
650	21	16	13	8	31	18

Сталь деформируется в горячем состоянии. Температурный интервал деформации 1180-950 °C после предварительного подогрева 650 °C. Охлаждение после деформации медленное.

Рекомендуемый режим предварительной термической обработки прутков и поковок: отжиг при 750-770 °C; крупно-габаритные поковки перед отжигом рекомендуется подвергать нормализации с 1130 °C. Рекомендуемый режим окончательной термической обработки: закалка с 1120-1150 °C в масле; отпуск при 680-730 °C на твердость НВ (d_{отп}) 3,2-3,7 мм или при 590-620 °C на твердость НВ (d_{отп}) 3,1-3,5 мм.

При обработке поверхности на чистоту, соответствующую 7 классу шероховатости и последующей пассивации сталь имеет удовлетворительную коррозионную стойкость.

Сталь удовлетворительно сваривается аргоно-дуговой, контактной и дуговой сваркой. После сварки необходимо производить отпуск для снятия внутренних напряжений.

Назначенная конструктором заготовка – точная объёмная штамповка, под холодную вальцовку. Термообработка и контроль свойств по Е-610.

Обрабатываемость материала резанием невысока: она характеризуется коэффициентом обрабатываемости 0,55. Отмечается очень низкая стойкость лезвийного инструмента при обработке данного материала.

Материал характеризуется также тем, что при обработке его лезвийным инструментом при неоптимальном выборе усилий и режимов резания происходит не срезание стружки с поверхности, а её выглаживание. В частности необходимо учитывать, что малая подача и небольшой припуск, снимаемый за один проход, будут способствовать появлению этого эффекта.

6 Наличие установочных баз при изготовлении детали

Одним из основных достоинств любого технологического процесса является возможность обеспечения не только точности, но и стабильности обработки. Достигается это благодаря простоте конструктивных форм детали, надёжности технологических баз, жесткости конструкции детали. Отсутствие у деталей простых поверхностей достаточной протяженности не позволяет использовать их в качестве надёжных технологических баз (установочных, опорных).

В качестве технологической базы при обработке пера могут быть использованы поверхности замка. Эти поверхности для закрепления при обработке требуют специального приспособления.

7 Общая характеристика технологичности детали

Деталь характеризуется рядом конструктивных особенностей, неизбежно снижающих уровень технологичности по факторам: форма, материал,

процесс изготовления. Это связано с малой жесткостью детали, со сложностью поверхностей пера, с плохой обрабатываемостью материала, отсутствием надежных баз и необходимостью создания специальных вспомогательных технологических баз, по крайней мере, на этапах предварительной обработки лопатки. В то же время конструкция лопатки проработана на технологичность, и в пределах возможного технологические требования удовлетворяются по инструментальной доступности, контролепригодности. Обработка лопатки может осуществляться как стандартным режущим инструментом, так и специализированным. Элементы детали в основном соответствуют стандартному ряду инструментов.

Создана возможность механизации трудоемких доводочных работ при обработке пера, кромок и мест перехода от пера к хвостовику.

В тоже время перо лопатки тонкое и при обработке, вследствие высоких температур в зоне резания и больших усилий возможно его деформирование, поэтому необходимо осуществлять компенсацию усилий резания при обработке, либо производить обработку при небольшой подаче. Обработка должна производиться равномерно по всему перу за несколько проходов, этот приём позволит уравнивать перепад температур в разных частях пера и после раскрепления лопатку поведёт в меньшей степени. Оптимальной будет обработка за два прохода, первый проход черновое фрезерование всего пера, второй проход чистовое фрезерование.

Изготовление рабочих лопаток ротора компрессора высокого давления с 10 по 15 ст. выполняется по **групповому технологическому процессу**.

Перечень операций технологического процесса, а также используемое оборудование приведены в **таблице 6**.

Дадим краткое описание и проведем анализ технологического процесса. Будем рассматривать операции, на которых формируются основные поверхности лопатки и обеспечивается точность размеров и взаимного расположения поверхностей.

Операции 8 (10) «Штамповка». Заготовки для всех ступеней получают точной объёмной штамповкой под последующую холодную вальцовку.

Таблица 6 – Групповой технологический процесс

№ оп	Наименование операции	Оборудование		Примечание
		наименование	модель	
1	2	3	4	5
10	ВСШ	МОЛОТ	ВСМ-2	-
11	Разбивка штамповок на группы			
12	Травление			
15	Контроль входной			
18	Фрезерование облоя	Гор. - фрезерный	6Р81	
20	Фрезерование базового торца	Гор. - фрезерный	6Р81	
25	Протягивание боковых сторон и основания хвостовика	Вер.-протяжной	СПС-40	
30	Слесарная	Полиров. бабка		
35	Фрезерование торцов хвостовика	Гор.- фрезерный	6Р81	
40	Слесарная	Полиров. бабка		
45	Фрезерование R- перехода предварительное	Верт. фрезерный	12ШС-82	
50	Фрезерование выемок	Гор. фрезерный	6Р81	Для 141-2; 151-1
55	Фрезерование облегчения	Гор. фрезерный	6Р81	Для 101-1; 121-1
60	Фрезерование канавки поперечной	Гор. фрезерный	6Р81	Для 111-2; 131-1, 141-2, 151-1
65	Фрезерование канавки продольной	Гор. фрезерный	6Р81	Для 111-2; 131-1, 141-2, 151-1
70	Обсечка пера предварительная	Пресс	КД-2324	
75	Фрезерование выемки по «шип»	Гор. фрезерный	6Р81	Для 101-1, 111-1, 121-1, 131-1, 151-1
80	Фрезеровка «шипа»	Гор. фрезерный	6Р81	
85	Фрезеровка торца «шипа» (случайная)	Гор. фрезерный	6Р81	
90	Слесарная	Полиров. бабка		
95	Зенкерование фасок	Верт.-сверлильн.	2А125	Для 111-2; 131-1, 141-2, 151-1
100	Маркирование	Верстак		
105	Слесарная	Полиров. бабка		
110	Инерционно-абразивная обработка	Установка	12Т641	
115	Объёмное глянцеование	Установка	12Т641	
120	Промывка	Моечная машина	М217000	
125	Вальцевание	Стан	ВС-2С	
130	Промывка	Моечная машина	М217000	
135	Сдача в цех 15			Для 111-1, 121-1, 131-1, 141-2, 151-1
140	Термообработка (закалка)			
Продолжение таблицы 7				
1	2	3	4	5
145	Шлифование подошвы	Гор.- шлифовал.	3Г71	

150	Шлифование боковых сторон хвостовика	Гор.- шлифовал.	3Г71	
155	Промывка	Моечная машина	М217000	
160	Фрезерование R- перехода окончательное	Верт.- фрезерный	12ПС-82	
165	Слесарная	Полиров. бабка		
170	Контроль промежуточный	Стол		
175	Полирование R-перехода	Полиров. бабка		
180	Полирование R на хвостовике со входа	Полиров. бабка		131-1
185	Обсечка пера окончательная	Пресс	КД-2324	
190	Рихтовка профиля пера	Верстак		
195	Предварительное полирование пера лопатки	Ленточный виброполировальный	ЛВП-3М	
200	Полирование входной и выходной кромок	Полировальная бабка		
205	Окончательное полирование пера лопатки	Ленточный виброполировальный	ЛВП-3М	
210	Промывка	Моечная машина	М217000	
215	Слесарно-контрольная	Сл. верстак		
220	Глянцевание профиля пера (случайная)	Полировальная бабка		
225	Контроль окончательный			Для 101-1, 111-2, 121-1, 131-1, 141-2, 151-1
230	Сдача в цех 15			
235	Термообработка			Для 101-1, 111-2, 121-1, 131-1, 141-2, 151-1
240	ЛЮМ-1			
245	Магнитный контроль			101-1
250	Промывка	Моечная машина	М217000	
255	Контроль			
260	Слесарно-доводочная (случайная)	С\стол		
265	Упрочнение пера и хвостовика	Спец. установка	УСМ-1	
270	Контроль после упрочнения			
275	Контроль ЧСК	Установка	12Т591	
280	Клеймение	Верстак		
285	Сдача с гр. сборки			

Припуск по спинке и корыту для детали 131-1 составляет 1,1-1,6 мм, для остальных 1,1-1,7 мм; допуск на толщину пера +0,3 мм. Допустимый разворот профиля пера для корневого сечения $\pm 12'$ (для 10 ступени $\pm 15'$), для остальных сечений до $\pm 45'$. Допустимые отклонения профиля пера в сечениях 5-5... 7-7 $\pm 0,1$ мм, в остальных $\pm 0,15$ мм.

Контур заготовки по профилю пера и замку имеет форму, близкую к форме готовой детали (за исключением торцев замка). Штамповки разбиваются на 7 групп в зависимости от размера $C_{\max}$ в сечении A_6-A_6 .

Операция 20 «Фрезерование базового торца» выполняется для обеспечения установки лопатки в заданное положение на операции 25.

Операция 25 «Протягивание боковых сторон и основания хвостовика». База - перо лопатки и торец хвостовика. Предварительно протягивается 1-ая лопатка и контролируются геометрические параметры: смещение профиля пера от номинального положения в направлении оси Z в корневом сечении не более 0,1 мм, разворот не более $\pm 12'$; разность размера Π на длине хвостовика 0,02 мм; угол замка 70° (проверяется на специальном приборе); неплоскостность боковых сторон хвостовика не более 0,005мм; равномерность припуска по профилю пера лопатки проверяется на приборе ПОМКЛ-4 во всех расчётных сечениях. Затем протягивается партия лопаток.

Операция 35 «Фрезерование торцов хвостовика» - в качестве базы используются боковые поверхности и подошва замка. Операция обеспечивает взаимное расположение профиля пера и замка, при этом осуществляется распределение припуска по перу, неравномерность которого не должна превышать 0,15 мм в пределах одного сечения.

Операция 45 «Фрезерование R- перехода предварительное», базы - боковые поверхности и подошва замка. Одновременно обрабатывается 2 заготовки на копировальном станке. У первой фрезеруется R-перехода на спинке у второй на корыте. Затем лопатки перезакрепляют. Врезание в профиль пера не допускается.

Операции с 50 по 95 (фрезерование выемок, облегчений, канавок, шипа, зенкерование фасок) выполняются на одних и тех же базах - боковые поверхности и подошва замка.

Перед **операцией 125** «Вальцевание» выполняется слесарная доработка входной и выходной кромок, инерционно-абразивная обработка, объёмное глянцеование. Данная операция позволяет получить точный профиль пера лопатки. После вальцевания предусмотрена термообработка –закалка (Оп.140).

Дальнейшие операции представляют собой отделку и доработку поверхностей замка и профиля пера.

Операция 145 «Шлифование подошвы». Базы – боковые поверхности и торцы замка. Подошва замка в дальнейшем используется в качестве основной установочной базы при шлифовании боковых поверхностей хвостовика на **операции 150**. Дополнительной базой на этой операции является перо лопатки. После выполнения данной операции осуществляется контроль геометрических параметров: смещение профиля пера от номинального положения в направлении оси Z в корневом сечении не более 0,1 мм, разворот не более $\pm 12'$; разность размера П на длине хвостовика 0,02 мм; угол замка 70° (проверяется на специальном приборе); неплоскостность боковых сторон хвостовика не более 0,005мм (проверяется по краске).

Операция 160 «Фрезерование R- перехода окончательное» - выполняется аналогично операции 45 «Фрезерование R- перехода предварительное».

После операций 165 «Слесарная» и 170 «Контроль промежуточный» выполняются отделочные операции 175 «Полирование R-перехода» и 180 «Полирование R на хвостовике со входа». Затем осуществляется окончательная обсечка пера (Оп.185) и рихтовка профиля (Оп.190).

На **операциях 195-205** окончательно формируются как геометрия профиля пера, так и шероховатость поверхности.

Последующие операции носят доводочный и контрольный характер.

Проведённый анализ показывает, что базовый технологический процесс **обеспечивает требования по точности и качеству изготовления лопаток**. Соблюдается основные принципы формирования поверхностей: обработка замка на базе пера, а затем пера на базе замка.

В тоже время необходимо отметить следующее:

1. Применяемое оборудование является устаревшим как морально, так и физически. Все станки универсальные, что на современном этапе развития техники негативно сказывается на производительности труда.
2. Практически на всех операциях необходимо использовать специальные приспособления, что приводит к значительным затратам.

3. На операциях механической обработки применяется устаревший режущий инструмент, который не может обеспечить повышения режимов резания при высоком качестве обрабатываемой поверхности.
4. Весьма велика доля ручных доводочных работ, что также значительно увеличивает трудоёмкость и затраты.
5. Возможная нестабильность процесса обработки приводит к необходимости проведения значительного количества контрольных измерений и отдельных контрольных операций, увеличивающих трудоёмкость. Это в свою очередь требует применения большого количества специальных контрольно-измерительных приспособлений и приборов.

В последнее время на ОАО «Кузнецов» осуществляются работы по внедрению нового оборудования, а именно станка фирмы Микрон UCP 600 VARIO Torque RTT с системой ЧПУ HEIDENHAIN TNC 530 оснащенного наклонно-поворотным столом с дополнительно установленной задней бабкой для изготовления лопаток ротора и статора компрессора.

Особенностью разработки технологии изготовления лопатки на станке с ЧПУ является то, что результат полностью зависит от качества разработанной **3D** модели детали, алгоритмов написания управляющих программ и работы постпроцессора. Другими словами результат полностью зависит от этапа работ выполняемого вне станка на компьютере в CAD CAM системе.

Станок Микрон UCP 600 VARIO Torque RTT оснащён задней бабкой со стандартными центрами, вращающимся или неподвижным. Максимально возможное давление на деталь составляет 40 бар. Система управления позволяет предварительно задать два значения давления прижима и переключать их с помощью системы управления ЧПУ по команде в управляющей программе обработки. Такой подход дает возможность использовать разные усилия прижима задней бабкой для черновой и чистовой обработки.

В качестве заготовки используется штамповка с окончательно обработанным замком лопатки. Соответственно и закрепление заготовки осуществляется за замковую часть.

Для зажима заготовки с предварительно обработанным замком используются специальные губки, имеющие профиль замка лопатки и различные по толщине для учёта смещения оси лопатки от плоскости симметрии замка. Для задания положения оси лопатки в конструкции губок был предусмотрен специальный упор, также как и в приспособлении для измерений.

В случае станка MIKRON UCP 600 Vario Torque для обеспечения максимальной жесткости при обработке используется контр - опора в виде подвижной задней бабки с упорным вращающимся центром.

Такой способ закрепления требует, чтобы заготовка была предварительно зацентрирована. Центровать заготовки можно как на отдельном станке, так и на станке MIKRON UCP 600 Vario Torque. Чтобы получить необходимую точность изготовления лопатки и стабильность размеров в партии центровочное отверстие и обработку лопатки выполняют на одном станке.

Процесс фрезерования реализован традиционно: сначала черновая обработка для удаления основного объёма материала, затем полустачная обработка для выравнивания припуска и формирования тракторных поверхностей и пера лопатки и далее чистовая обработка для получения требуемой геометрической точности и шероховатости поверхности.

Схема обработки с поджатием пера лопатки центром повышает жесткость технологической системы, однако при этом возникают следующие проблемы, связанные с малой толщиной пера лопатки:

- усилие создаваемое задней бабкой приводит к упругой деформации пера, которая после обработки может привести к дополнительным погрешностям расположения профиля;
- поджим по центровому отверстию не исключает поворота пера лопатки относительно оси под действием сил резания, что приводит к необходимости снижения режимов обработки и также может вызвать погрешности расположения профиля.

Лекция 2

Создание 3D моделей типоразмеров лопаток КВД и оценка возможности их изготовления из единой заготовки

1 Разработка 3D моделей лопаток

Построение моделей лопаток производится в CAD/CAM системе **Siemens NX 7.5**. Исходными данными служат чертежи деталей. Укрупнённо, всю информацию, содержащуюся в конструкторской документации и определяющую геометрию лопатки можно разделить на две основные группы:

- координаты точек сечений профиля пера лопатки, определяемых геометрией проточной части двигателя;
- геометрическая информация, определяющая конструктивные элементы детали (границы и положение проточной части, геометрия замка, наличие «шпоры» и т.д.).

Первая группа является наиболее трудоёмкой с точки зрения построения. Большой объем информации, заполнение которой производилось вручную на листах бумаги, с большой долей вероятности может содержать (и содержит) явные ошибки, которые определяются при построении в виде неплавных линий профиля. Отсутствие электронного документооборота вносит дополнительные сложности в «расшифровку» рукописного текста.

Построение модели лопатки начинается с создания наборов точек, определяющих сечения «спинки» и «корытца» лопаток для каждого заданного сечения, в виде текстовых файлов. Данные из конструкторской документации переносятся в файл формата ***.txt**, и записываются в виде строк, содержащих координаты **x**, **y** и **z**, через знак табуляции, где десятичные знаки отделяются точками (особенности программного комплекса **NX**). В результате данного процесса формируется набор файлов, содержащих координаты точек сечений профилей. Профили «спинки» и «корыта» одного сечения должны находиться в разных файлах. Таким образом, если в конструкторской документации определено 8 различных сечений, то в результате выполнения первого этапа

создания модели лопатки, должны быть сформированы $8 \cdot 2 = 16$ файлов. Примеры формирования файлов представлены на **рисунке 1**.

A1C.txt — Блокнот			A1K.txt — Блокнот			A2C.txt — Блокнот			A2K.txt — Блокнот		
Файл	Правка	Формат	Файл	Правка	Формат	Файл	Правка	Формат	Файл	Правка	Формат
-11.63	-0.89	0	-11.59	-1.19	0	-11.70	-0.71	0	-11.67	-1.02	0
-11.29	-0.69	0	-11.23	-1.14	0	-11.36	-0.51	0	-11.31	-0.98	0
-11.04	-0.54	0	-10.97	-1.10	0	-11.11	-0.37	0	-11.05	-0.95	0
-10.43	-0.19	0	-9.68	-0.84	0	-10.48	-0.04	0	-10.40	-0.87	0
-9.80	0.11	0	-9.03	-0.70	0	-9.85	0.25	0	-9.75	-0.76	0
-9.18	0.39	0	-7.75	-0.39	0	-9.21	0.51	0	-9.10	-0.64	0
-7.92	0.89	0	-6.47	-0.07	0	-7.94	0.97	0	-7.80	-0.39	0
-6.65	1.32	0	-3.89	0.52	0	-6.66	1.36	0	-6.51	-0.13	0
-4.09	2.03	0	-1.31	1.04	0	-4.08	1.98	0	-3.92	0.37	0
-1.51	2.57	0	1.29	1.46	0	-1.48	2.44	0	-1.32	0.81	0
1.09	2.96	0	3.89	1.81	0	1.13	2.74	0	1.29	1.15	0
3.71	3.18	0	6.51	2.06	0	3.76	2.87	0	3.90	1.41	0
6.35	3.25	0	9.13	2.23	0	6.40	2.85	0	6.53	1.59	0
9.01	3.16	0	11.78	2.29	0	9.06	2.67	0	9.16	1.69	0
11.69	2.93	0	13.11	2.26	0	11.73	2.36	0	11.80	1.68	0
13.04	2.77	0	14.44	2.22	0	13.07	2.14	0	13.12	1.63	0
14.39	2.56	0				14.42	1.90	0	14.45	1.55	0

Рисунок 1 - Формирование файлов с координатами точек профиля
После формирования файлов, содержащих координаты точек сечений профиля пера лопатки, приступаем к созданию самой модели. Для упрощения процесса сборки, целесообразно расположить начало координат модели на оси вращения ротора и направить ось **X** вдоль данной оси вращения от компрессора к турбине.

1. В плоскости **X-Y**, при помощи команды **Эскиз**  строятся оси, определяющие угол позиционирования лопатки на диске и систему координат **X-Y**, в которой задаются точки сечений профиля пера лопатки. Результаты построений показаны на **рисунке 2**.

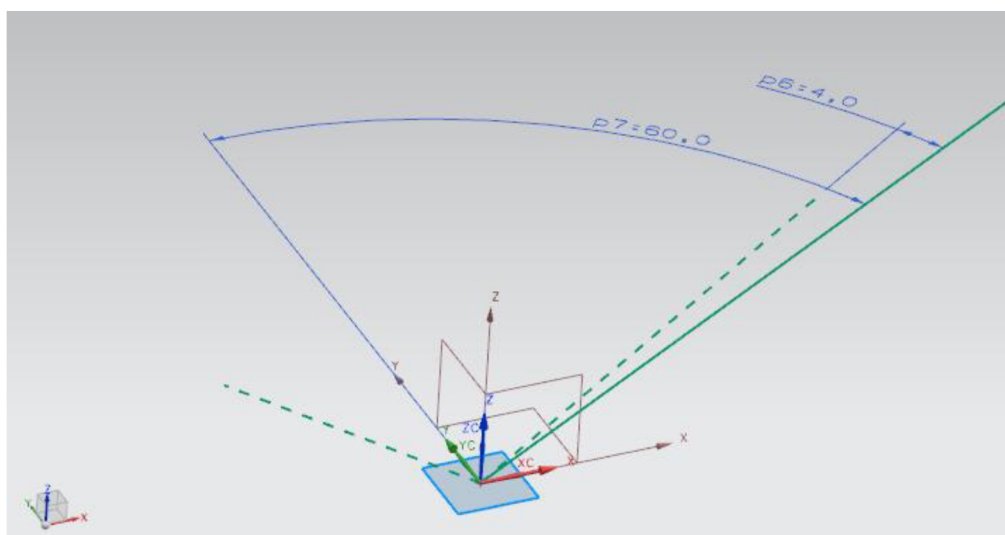


Рисунок 2 - Угол позиционирования лопатки на диске и система координат точек сечения профиля

2. При помощи команды **Координатная ось**, создаются две оси, определяющие положительные направления системы координат сечений профиля пера лопатки. Меню команды и результат построения показаны на **рисунке 3**.

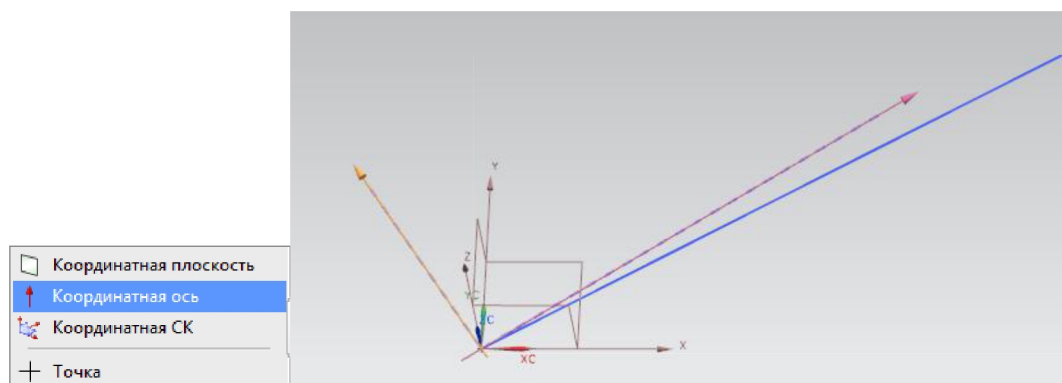


Рисунок 3 - Оси системы координат сечений профиля пера лопатки

3. Следующим этапом строится плоскость, первого сечения профиля пера лопатки при помощи команды **Координатная плоскость**. В качестве объектов выбирается плоскость **X-Y** и задается смещение вдоль оси **Z**, согласно чертежа детали. Результат построения показан на **рисунке 4**.

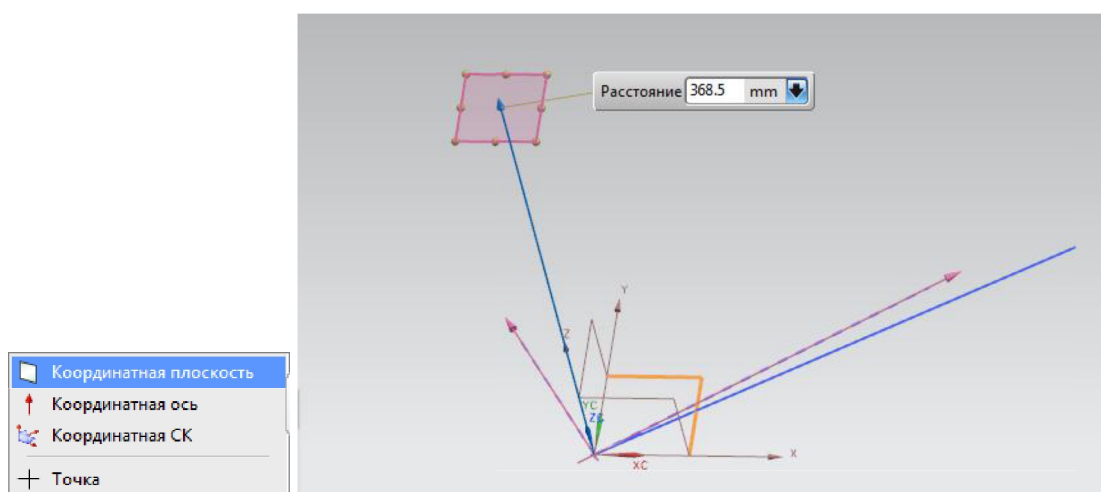


Рисунок 4 - Создание плоскости первого сечения

4. Далее создается эскиз, который будет содержать профиль сечения пера лопатки. При выборе базовой системы координат для эскиза выбирается система **Плоскость, Ось X, Точка**. В качестве плоскости выбирается объект, созданный на предыдущем шаге, в качестве **Направления оси X** – ось построенная на этапе 2. Начало системы координат устанавливается в точке базовой системы координат. Результат задания базовой системы координат для эскиза показан на **рисунке 5**.

5. При помощи команды **Слайн** импортируются данные о точках, формирующих профиль «спинки» и «корытца» данного сечения. В меню выби-

рается команда **Сплайн**, в открывшемся окне указывается способ построения **Через точки**, далее используется кнопка **Точки из файла**.

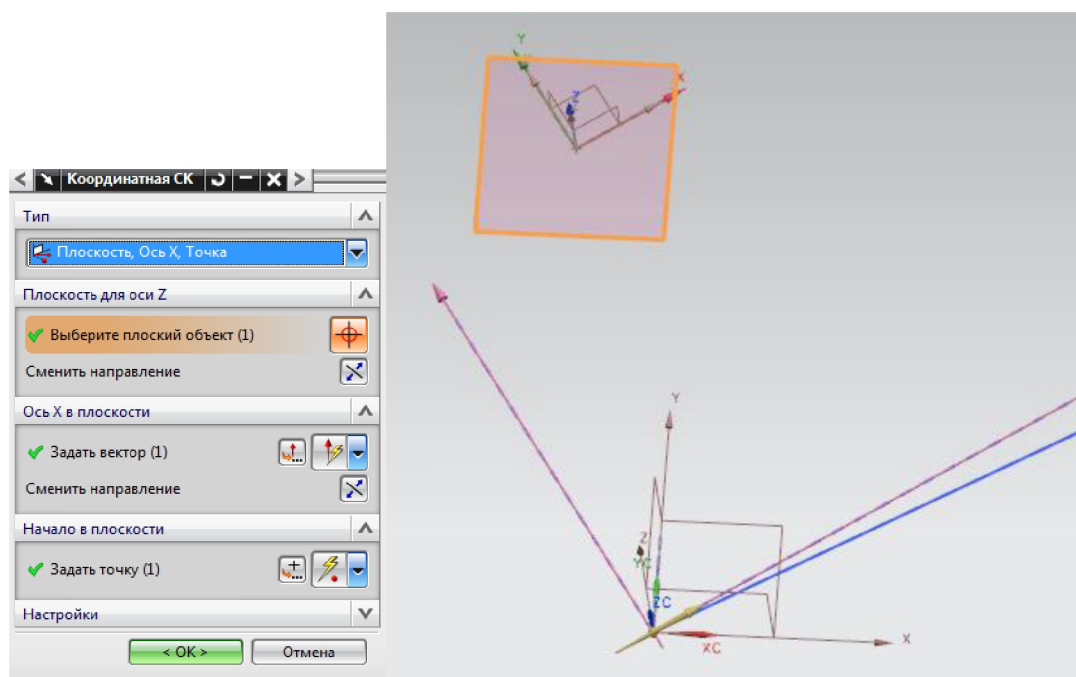


Рисунок 5 - Задание базовой системы координат для эскиза

В открывшемся окне браузера указывает файл-источник и нажимается кнопка **Ок**. Последовательность действий показана на **рисунке 6**, а результат построения - на **рисунке 7**.

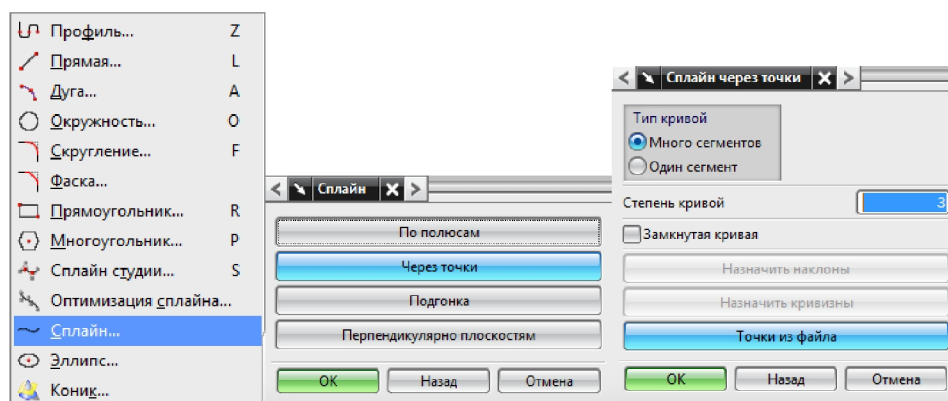


Рисунок 6 - Работа с функцией **Сплайн**

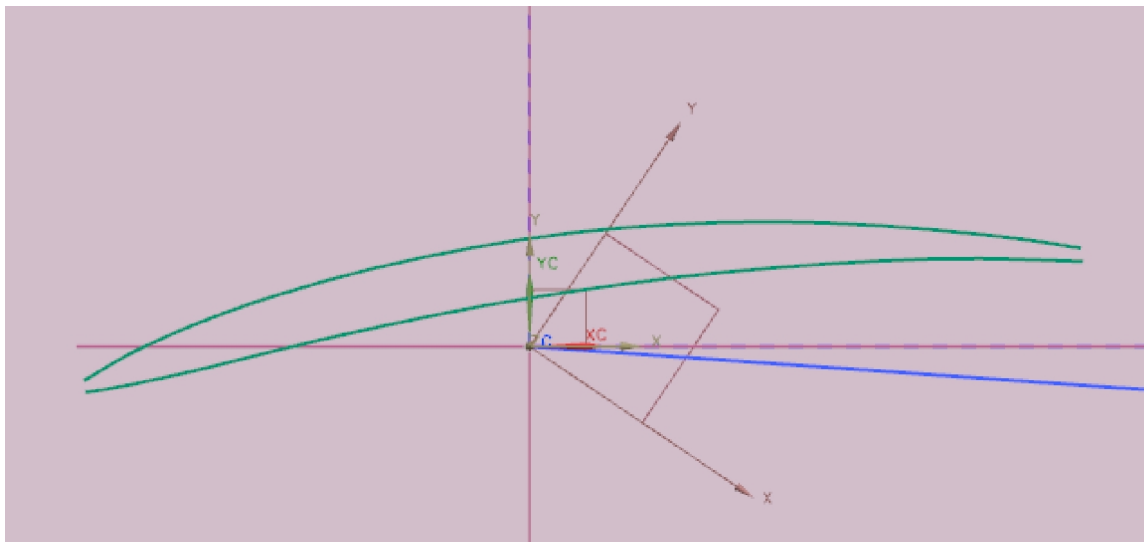


Рисунок 7 - Импортированные сечения "спинки" и "корыта"

6. Следующим этапом создаются окружности в районах входной и выходной кромок, линия, определяющая хорду сечения лопатки, и перпендикуляр к ней. На окружность, при помощи клавиши **C** на клавиатуре, либо кнопки **Ограничения**  накладываются ограничения касания с импортированными линиями профиля, на хорду – касание крайних точек сечения, перпендикуляр – касание окружности одной из кромок и перпендикулярность с хордой. Для определения геометрии устанавливаются два размера: положение входной кромки относительно начала системы координат профиля и длина хорды. Данный набор ограничений полностью определяет геометрию профиля, что отражается в изменении цвета линий с синего на зеленый. Результат построений показан на **рисунке 8**.

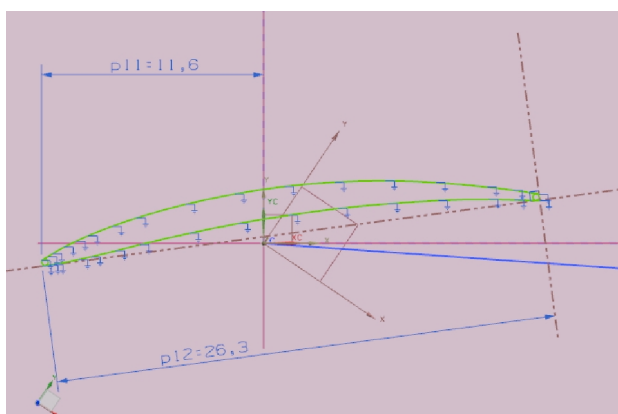


Рисунок 8 - Построенное сечение профиля пера лопатки

7. Повторяя последовательно 3, 4, 5, 6 этапы для каждого заданного сечения, получаем позиционированный набор сечений профиля пера лопатки. Результат показан на **рисунке 9**.

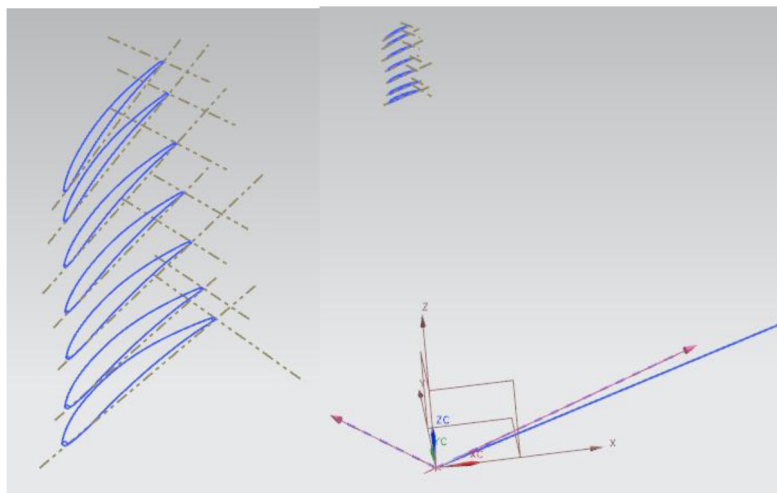


Рисунок 9 - Результат построения сечений профиля пера лопатки

8. При помощи команды **По кривым** , последовательно выбирая сечения, строится профиль пера лопатки. Результат построения показан на **рисунке 10**.

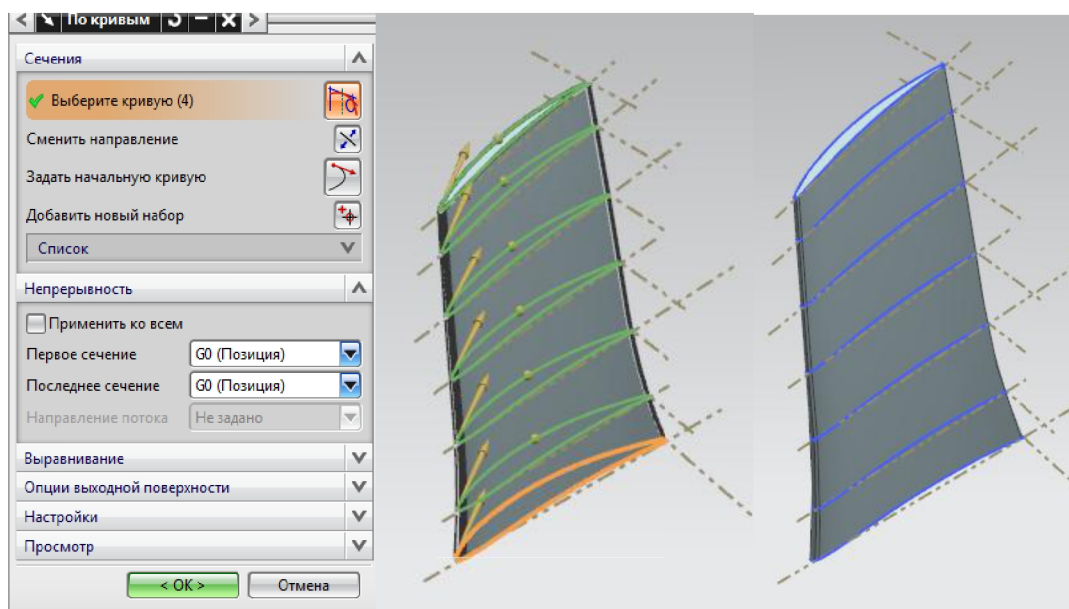


Рисунок 10 - Результат построения профиля пера лопатки

9. При помощи команд **Координатная плоскость** и **Эскиз** строятся базовая плоскость лопатки и в ней создается профиль замка. Точно задаются торцевые поверхности хвостовика, остальная геометрия задается с гарантированным припуском. Эскиз и результат построения показаны на **рисунке 11**.

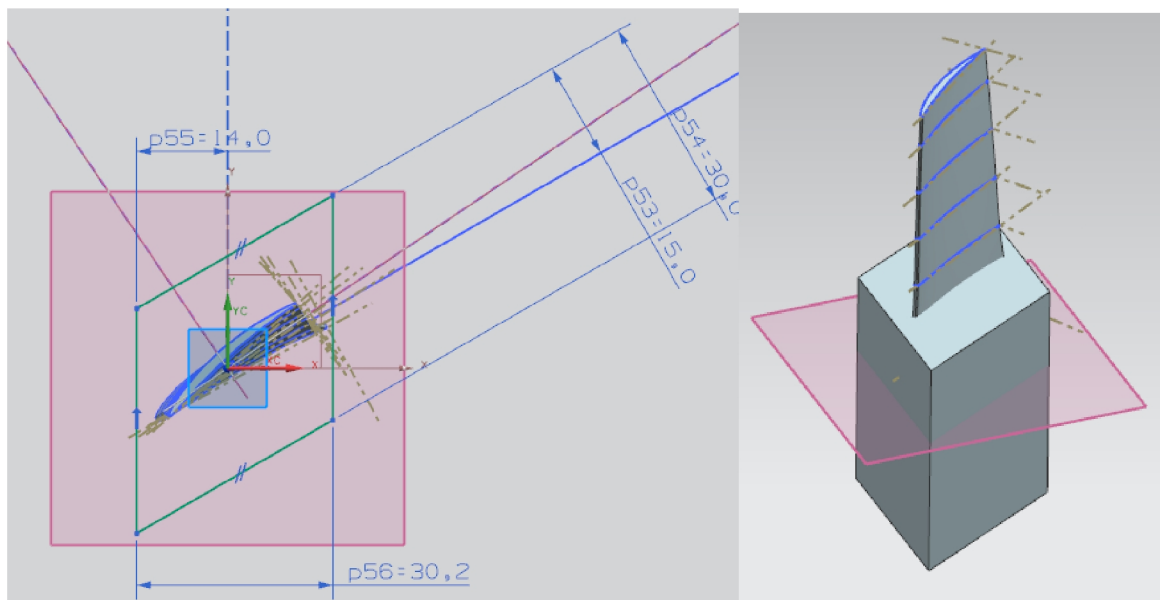


Рисунок 11 - Построение торцевых поверхностей и тела хвостовика

10. Используя боковую поверхность полученной геометрии в качестве базы для эскиза, определяется угол наклона подошвы хвостовика. Эскиз и результат построений, показаны на **рисунке 12**.

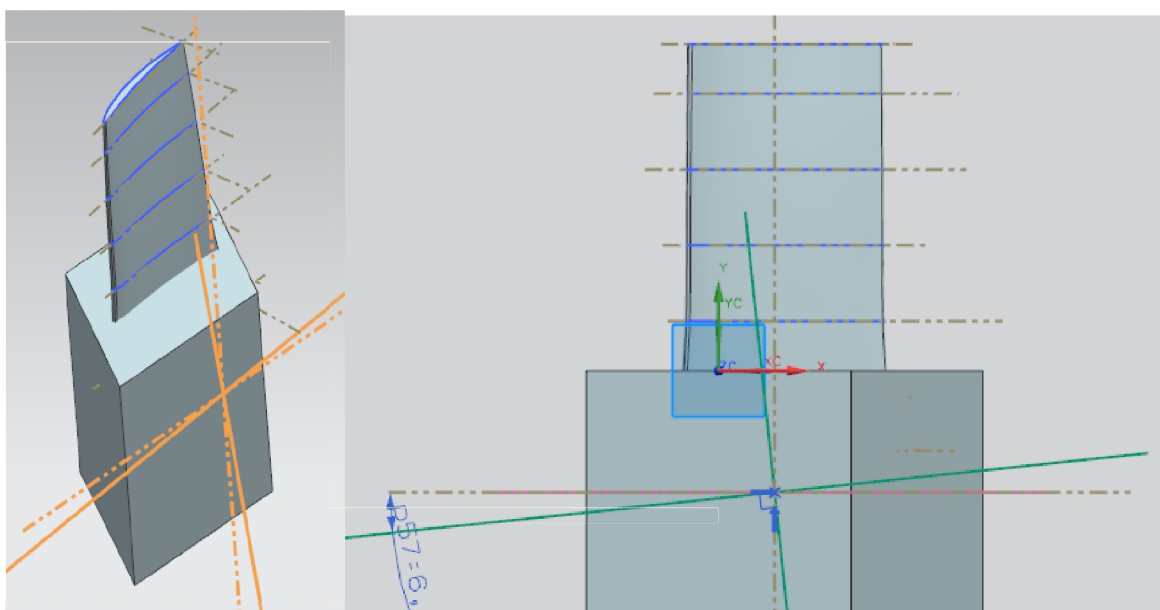


Рисунок 12 - Построение угла наклона подошвы хвостовика

11. Создается координатная плоскость методом **Под углом**, которая в последствии используется в операции **Обрезка тела** в качестве инструмента. В результате выполнения данного этапа формируется подошва хвостовика. Результат показан на **рисунке 13**.

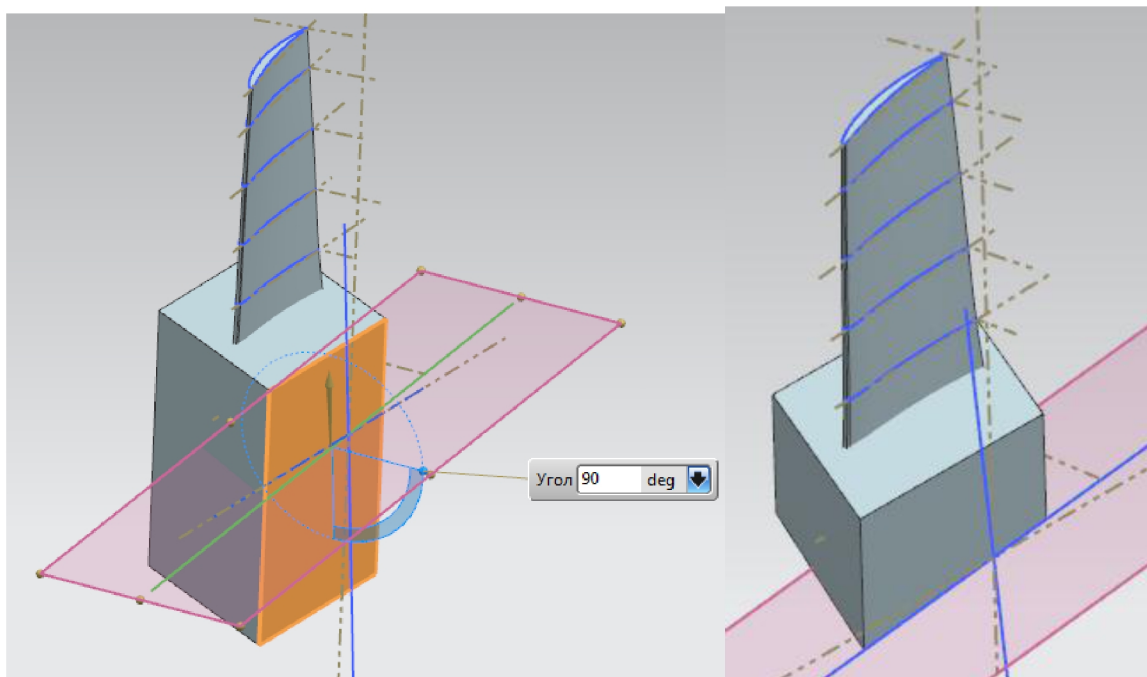


Рисунок 13 - Формирование подошвы хвостовика

12. Создается вспомогательная плоскость методом **Под углом**, которая используется в качестве базы для эскиза, определяющего продольное сечение хвостовика. Результат построения показан на **рисунке 14**.

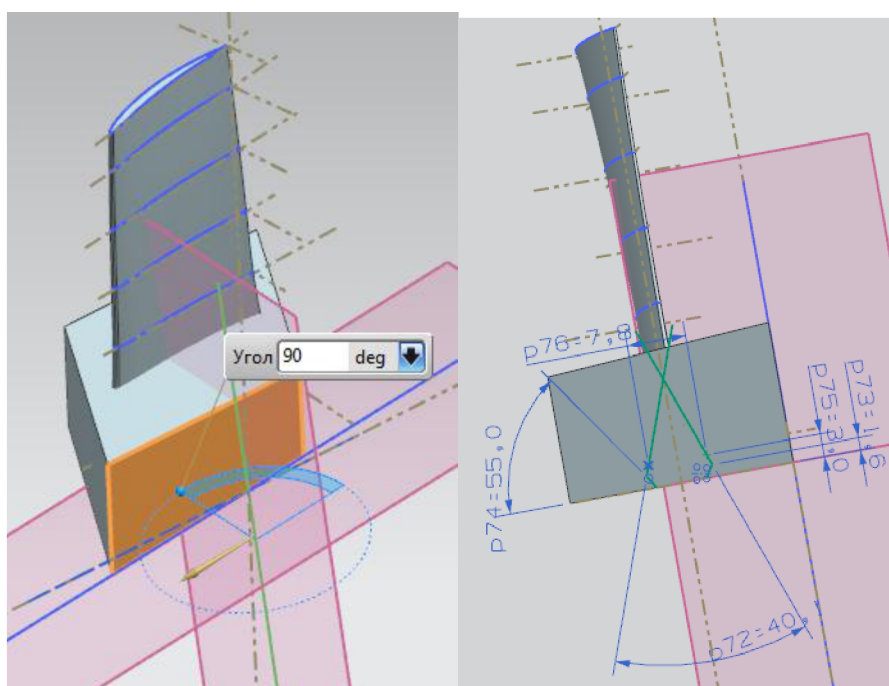


Рисунок 14 - Построение продольного сечения хвостовика

13. С использованием команды **Вытягивание**, строятся две поверхности, определяющие левую и правую часть хвостовика, после чего они используются в качестве инструмента в операции **Обрезка тела**. Результат показан на **рисунке 15**.

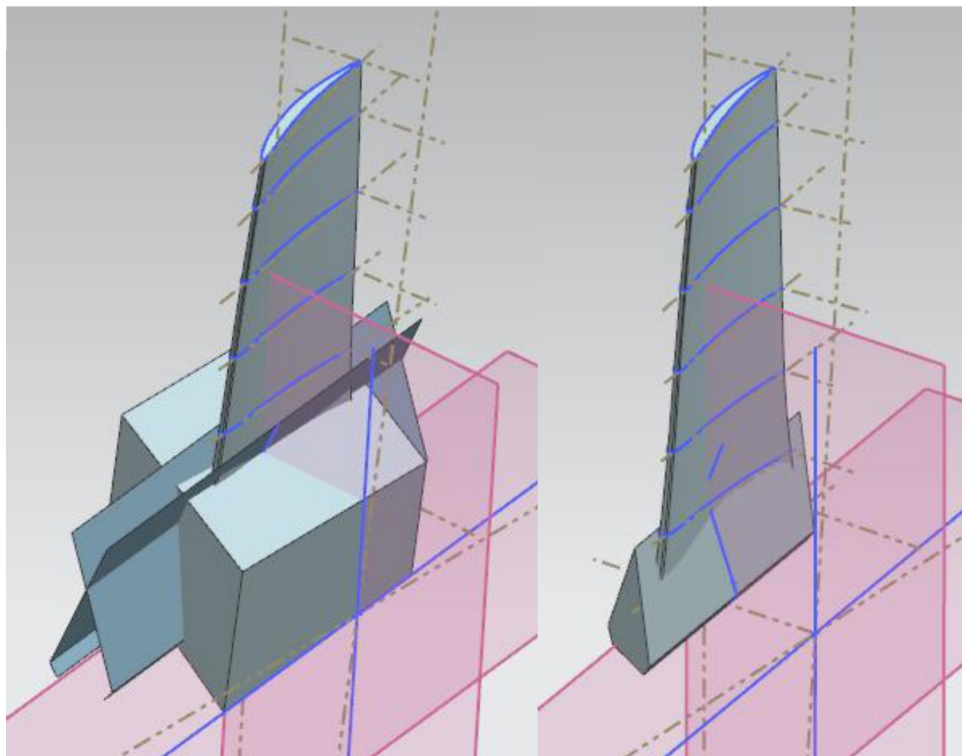


Рисунок 15 - Построение боковых поверхностей хвостовика лопатки

14. На торцах хвостовика лопатки строятся окружности, определяющие границы проточной части. Используя операцию **Конус**  и тип булевой операции **Пересечение**, формируется граница проточной части на хвостовике лопатки. Результат показан на **рисунке 16**.

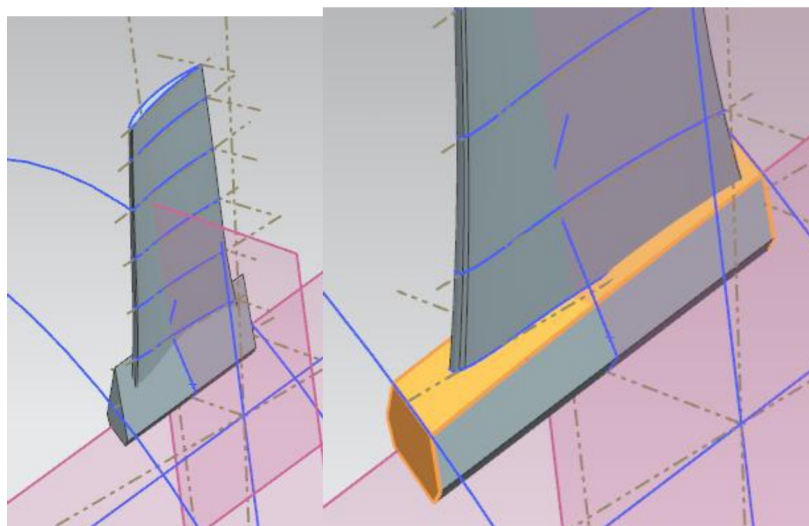


Рисунок 16-Формирование границы проточной части на хвостовике лопатки

15. С использованием команды **Заменить грань**  производится «стыковка» пера и хвостовика лопатки. Геометрия до и после операции показана на **рисунке 17**.

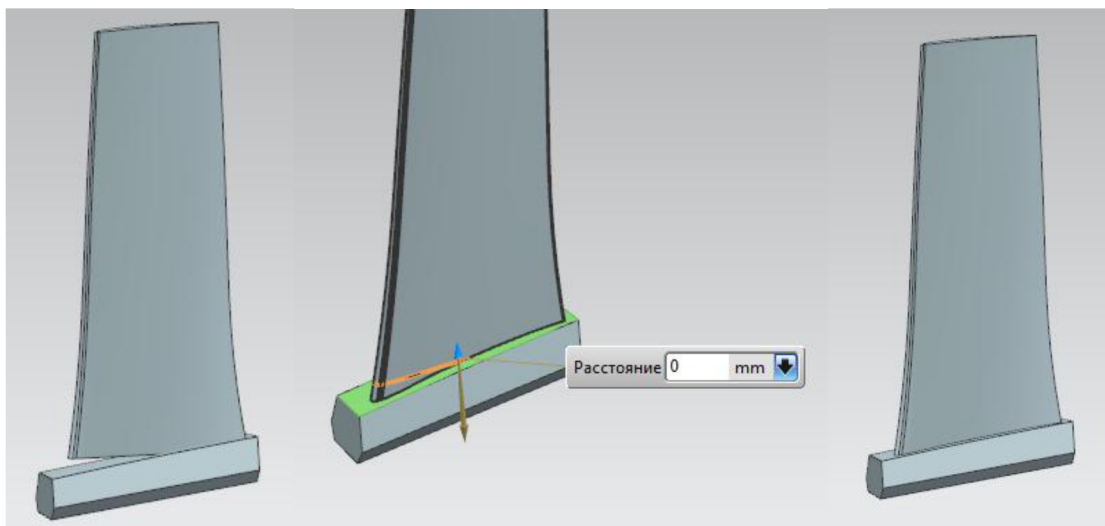


Рисунок 17 - Стыковка пера и хвостовика лопатки методом замещения грани

16. Производится объединение пера и хвостовика и скругление приком-
левого участка. Результат показан на **рисунке 18**.

17. Строится вспомогательная плоскость методом **На расстоянии**, парал-
лельная подошве хвостовика и смещенная на величину глубины проточки.

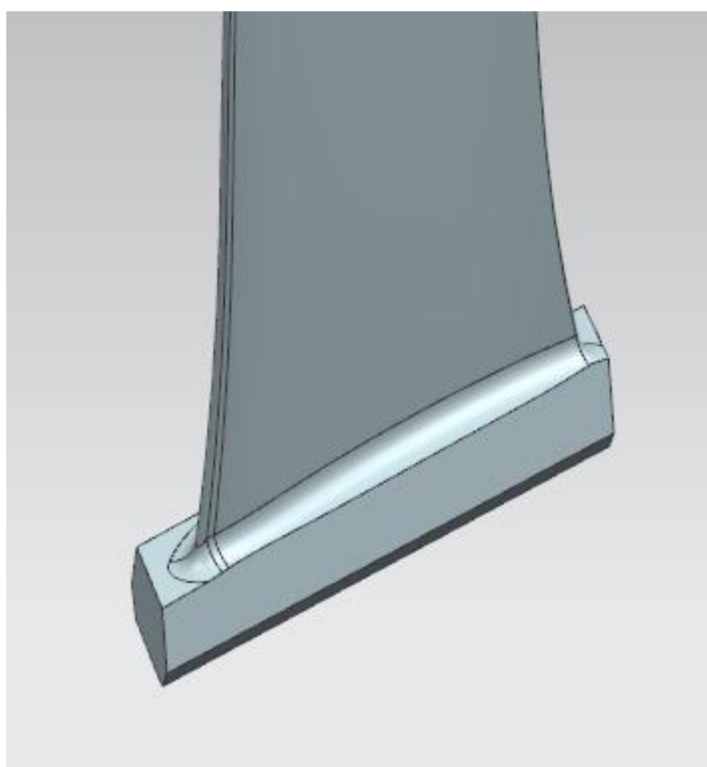


Рисунок 18 - Объединение пера и хвостовика и наложение скругления

Используя плоскость **X-Z** в качестве базовой для эскиза, строится кон-
тур проточки и, используя операцию **Вытягивание**, формируется тело. Ис-
пользуя построенную ранее плоскость в качестве инструмента операции **Об-**

резка тела, формируется граница проточки. Результат построения показан на рисунке 19.

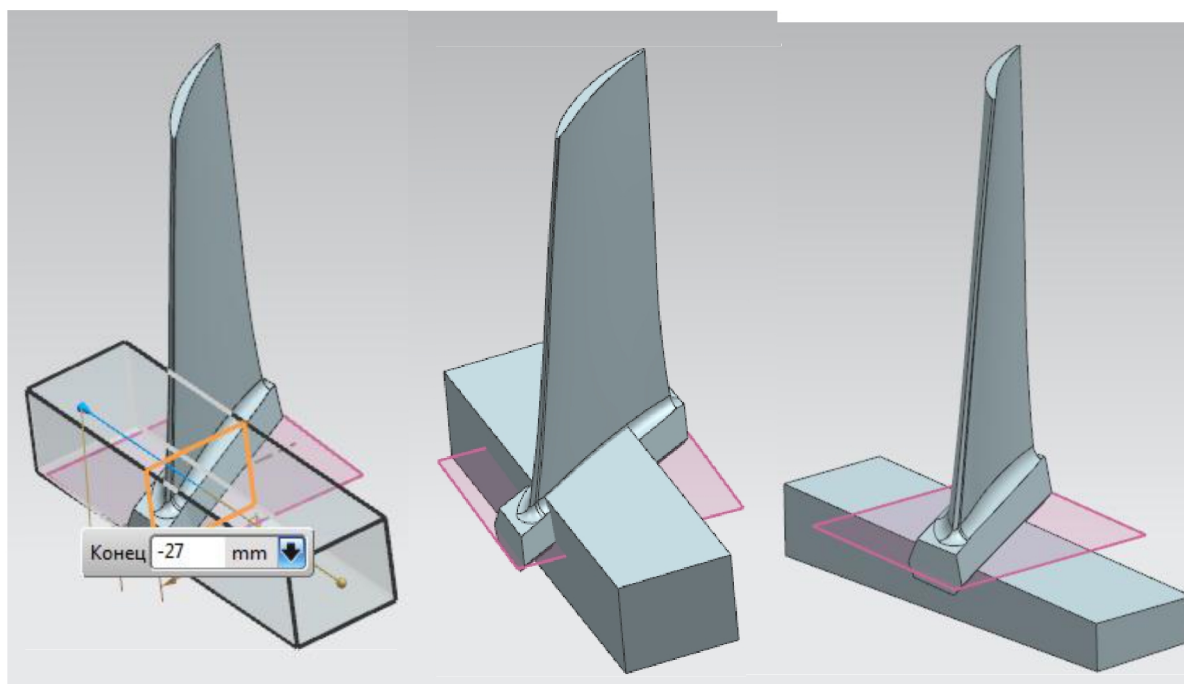


Рисунок 19 - Построение геометрии проточки

18. Производится вычитание тела проточки из модели лопатки и наложение скруглений (рисунок 20).

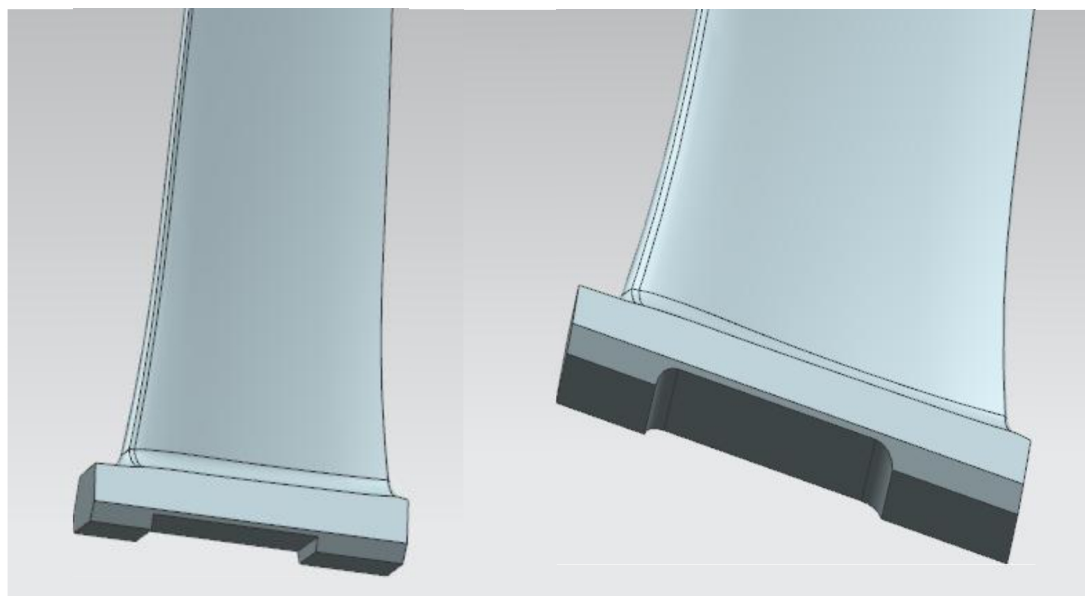


Рисунок 20 - Формирование проточки

19. С использованием функции **Кривые постоянного наклона**, формируются следы от входной и выходной кромок в направлении оси **Y**. Далее, используя плоскость **X-Z** в качестве базовой, строится контур наружной границы проточной части и методом **Вращение** строится листовое тело, которое

в последствие используется в качестве инструмента в операции **Обрезка тела**. Результат построения показан на **рисунке 21**.

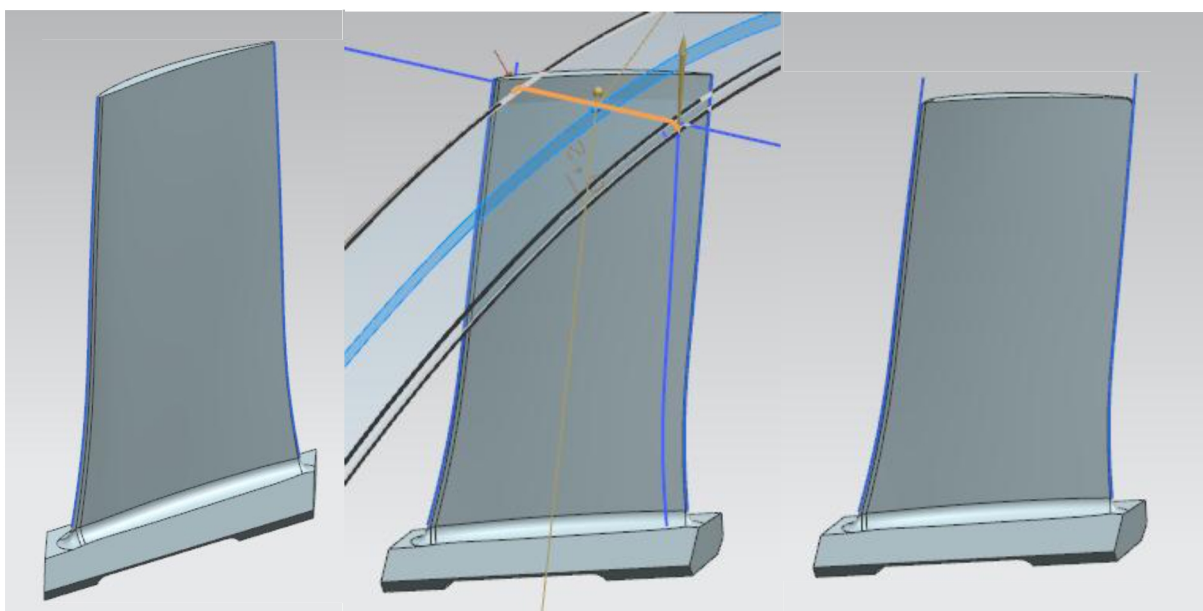


Рисунок 21 - Построение наружной границы проточной части

20. Для построения «шпоры» на плоскости **X-Y** строится эскиз, содержащий прямоугольный контур, ширина которого равна ширине «шпоры», после чего производится построение тела методом **Вытягивание**. Результат показан на **рисунке 22**.

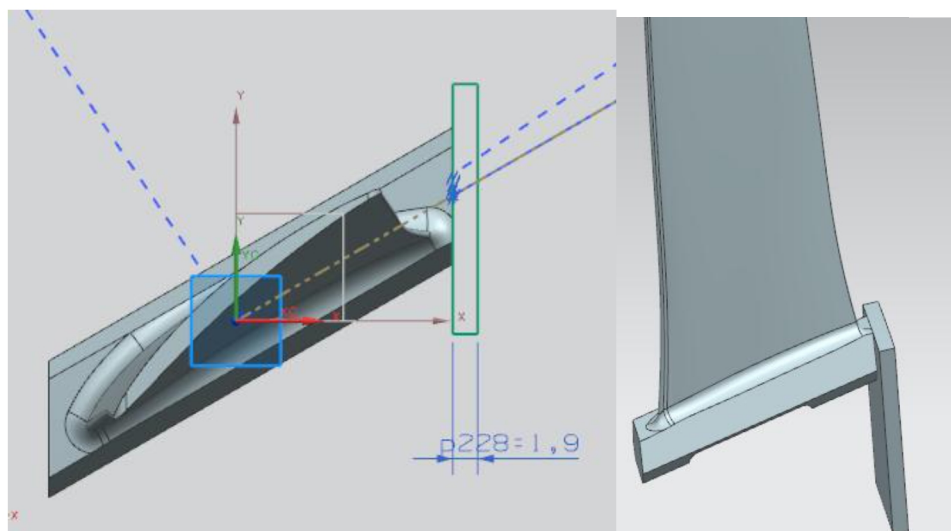


Рисунок 22 - Построение тела «шпоры»

21. Используя торец хвостовика в качестве базовой поверхности, строится эскиз, содержащий боковые грани «шпоры», после чего методом **Вытягивание** формируется листовое тело. При помощи операции **Обрезка тела** формируются боковые грани «шпоры». Результат построений показан на **рисунке 23**.

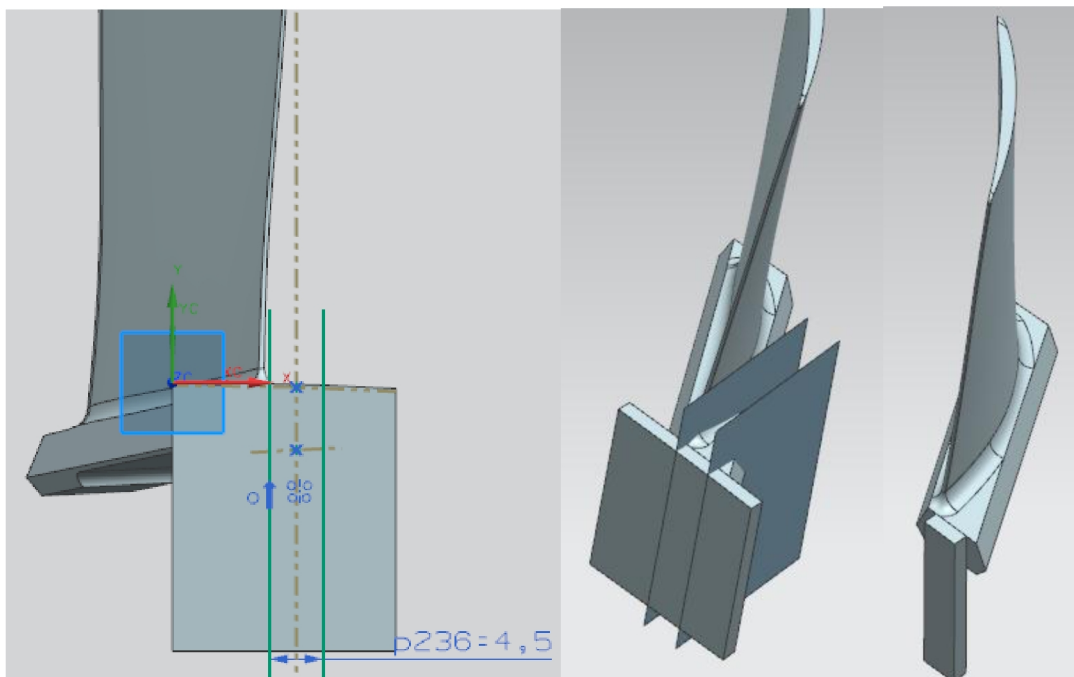


Рисунок 23 - Построение боковых граней «шпоры»

22. Для построения нижней грани «шпоры» строится вспомогательная плоскость методом **На расстоянии** от подошвы хвостовика. Далее, полученная плоскость используется в качестве инструмента в операции **Обрезка тела** для формирования нижней грани «шпоры». Результат построений показан на **рисунке 24**.

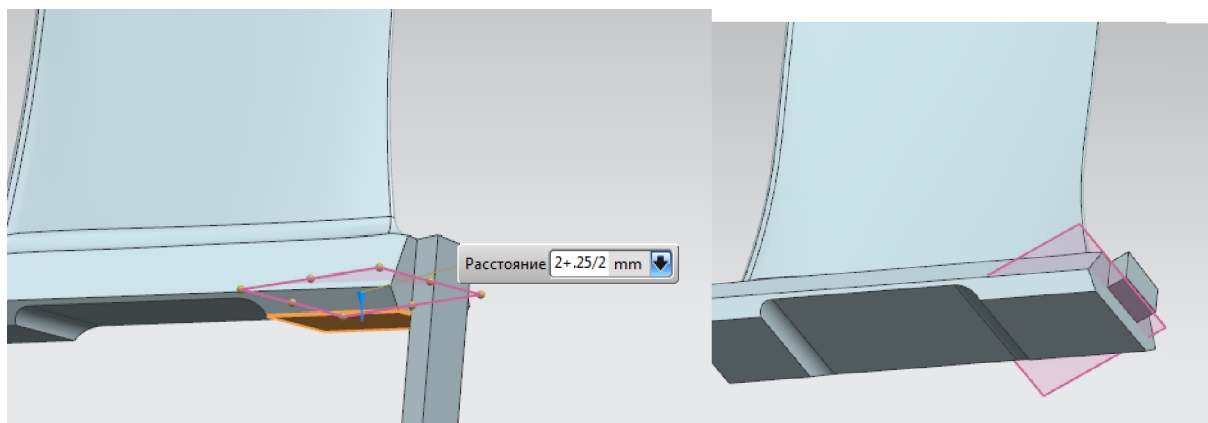


Рисунок 24 - Формирование нижней грани «шпоры»

23. После операции **Объединение** производится финишное наложение фасок и скруглений на участки «шпоры». Результат построений и готовая лопатка, показаны на **рисунке 25**.

Аналогичным образом строятся все типоразмеры лопаток компрессора. Данный метод позволяет быстро и эффективно создавать наборы типовых деталей газотурбинного двигателя и использовать их для узловой сборки с минимальными временными затратами на позиционирование.

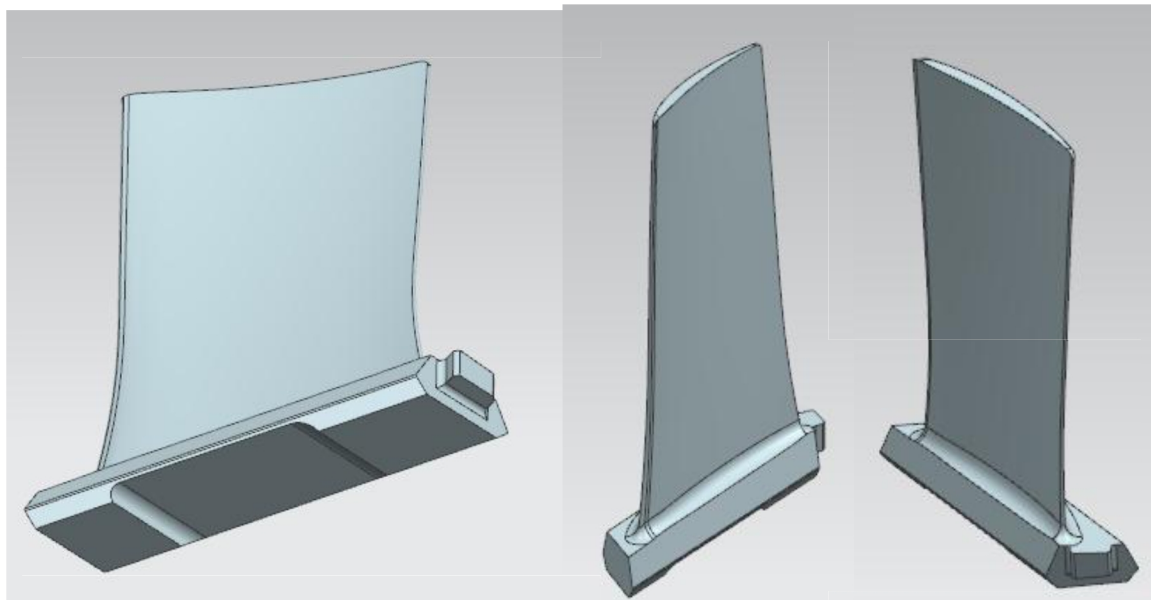


Рисунок 25 - Готовая модель лопатки

Полученная геометрия хорошо адаптирована к наложению операций многокоординатной механической обработки, и успешно подвергается конвертированию в универсальные форматы, такие как **stp** и **sat**, позволяя исключить появление проблемных зон поверхностей и ошибок геометрии, что было установлено в процессе проведения экспериментальных исследований.

2 Проверка условия получения нескольких типов лопаток из одной заготовки

Для получения информации о соответствии заготовок и лопаток необходимо произвести их сравнительный анализ. Для этого потребовалось построить **3D** модели лопаток и соответствующие им заготовки. Одним из важных параметров для тщательного анализа, является совмещение оси **3D** модели лопатки и **3D** модели заготовки. Цель совмещения установить угловое расположение модели лопатки и заготовки, таким образом, чтобы припуск по всем сторонам не имел больших расхождений.

Рассмотрим поочередно все лопатки заданных ступеней.

Лопатка 152.243.091-7 показана на **рисунке 26**. На данном чертеже выбраны оси, относительно которых будет выставлена **3D** модель лопатки.

Следующим этапом являлось обеспечение совмещения осей лопатки и заготовки. В результате была получена совмещенная **3D** модель лопатки и **3D** модель заготовки (**рисунок 28**).

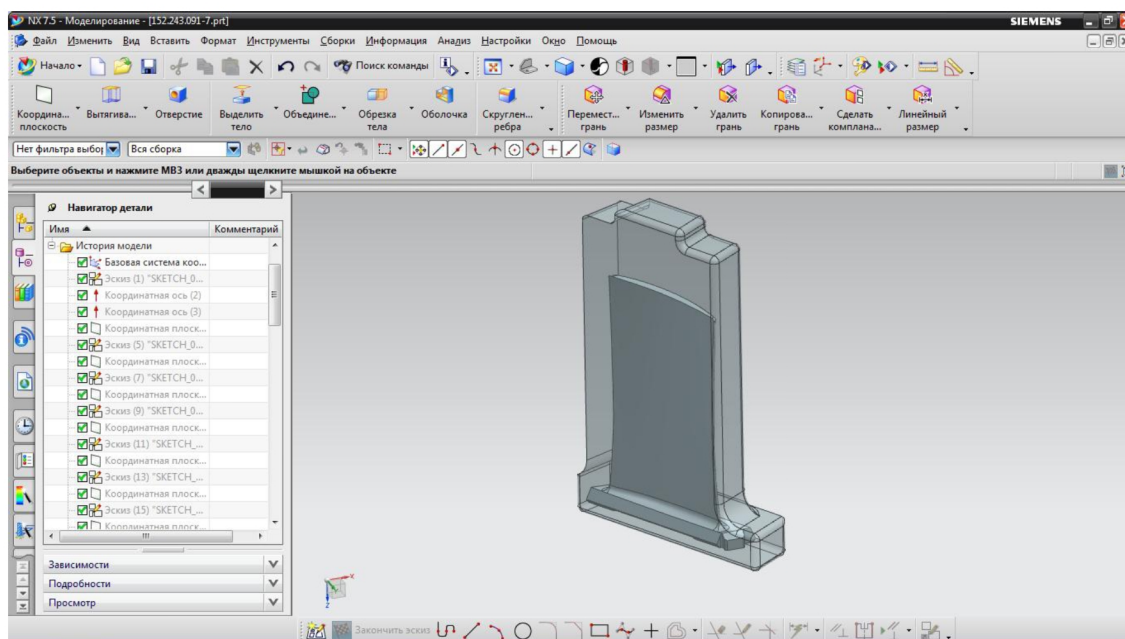


Рисунок 28 – Совмещенные 3D модели лопаток и заготовок

Следующим этап - измерение припуска относительно всех точек **3D** модели лопатки. Для этого были выявлены точки расположенные на наиболее удаленном расстоянии от оси лопатки. От этих точек были измерены минимальные расстояния до края заготовки (**рисунок 29**).

После проведенных измерений, делаем вывод о возможном выполнении данной лопатки из предложенной заготовки.

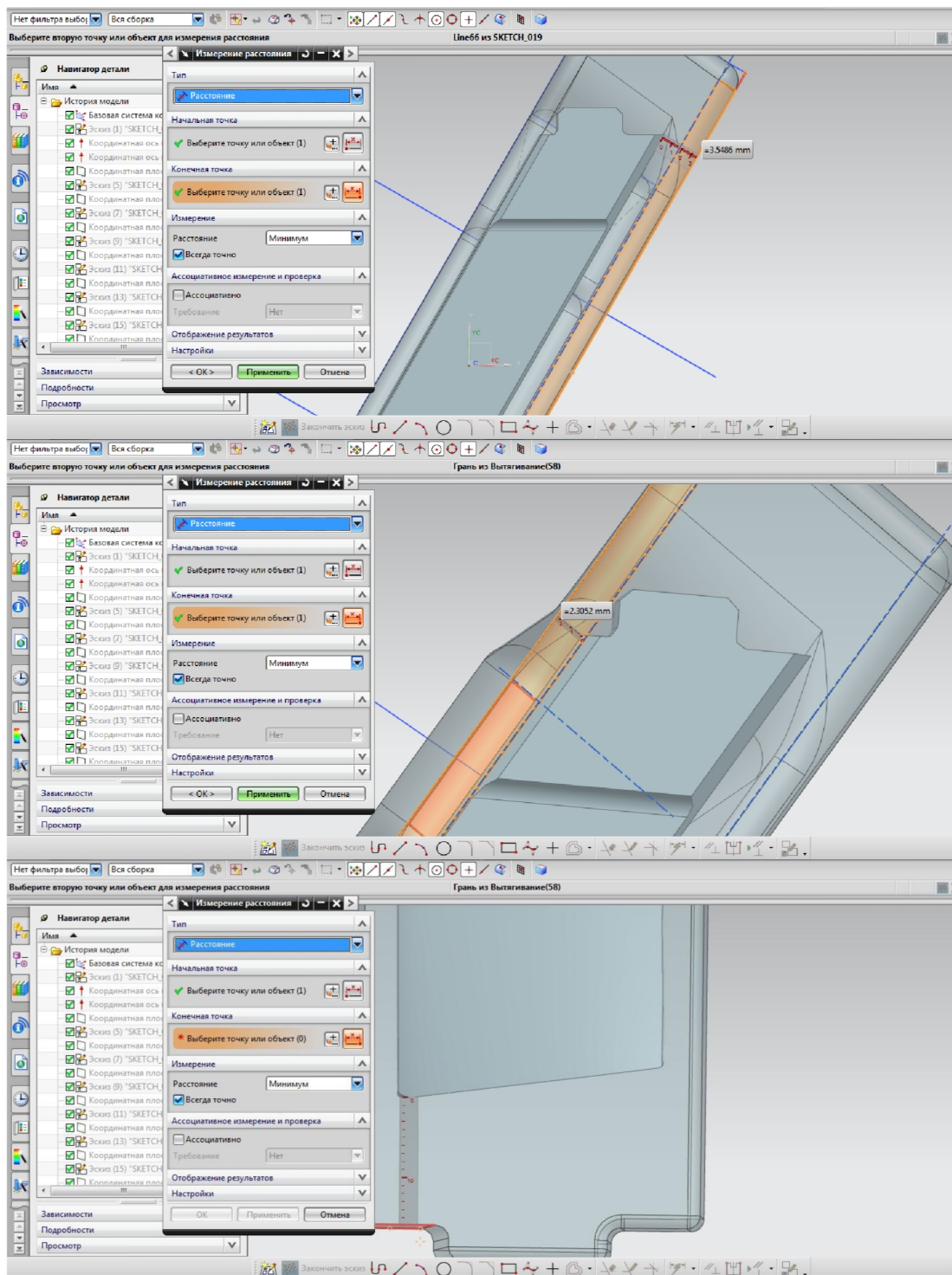


Рисунок 29 – Измерение минимального припуска

Лопатка 152.243.091-8 представлена на **рисунке 30**. На чертеже выбрали оси, относительно которых будет позиционирована **3D** модель лопатки.

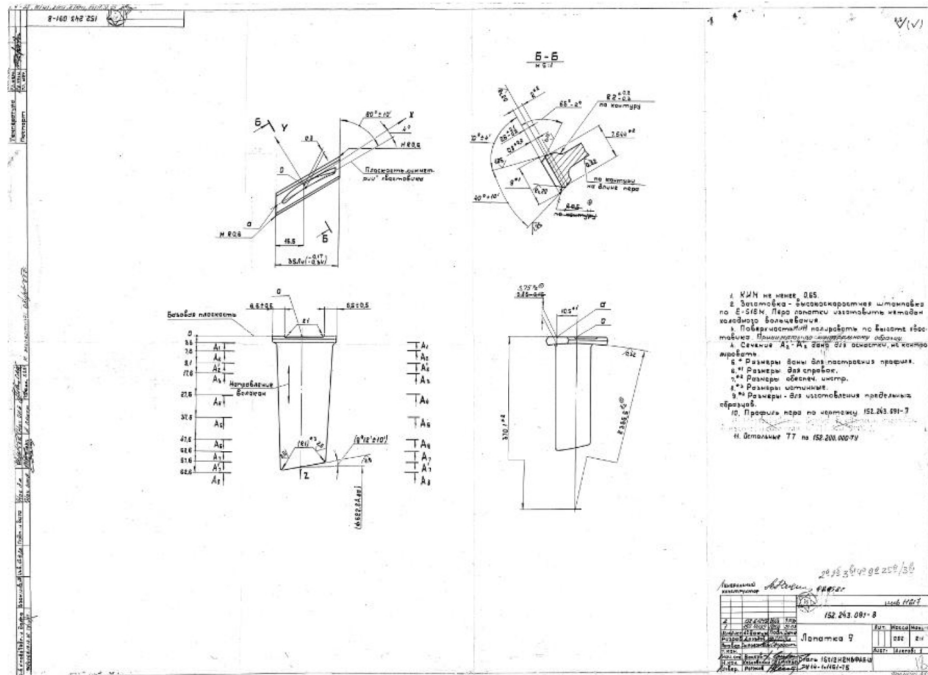


Рисунок 1.32 – Чертеж лопатки 152.243.091-8

Чертёж заготовки лопатки 152.243.091-7/8 представлен на **рисунке 31**.

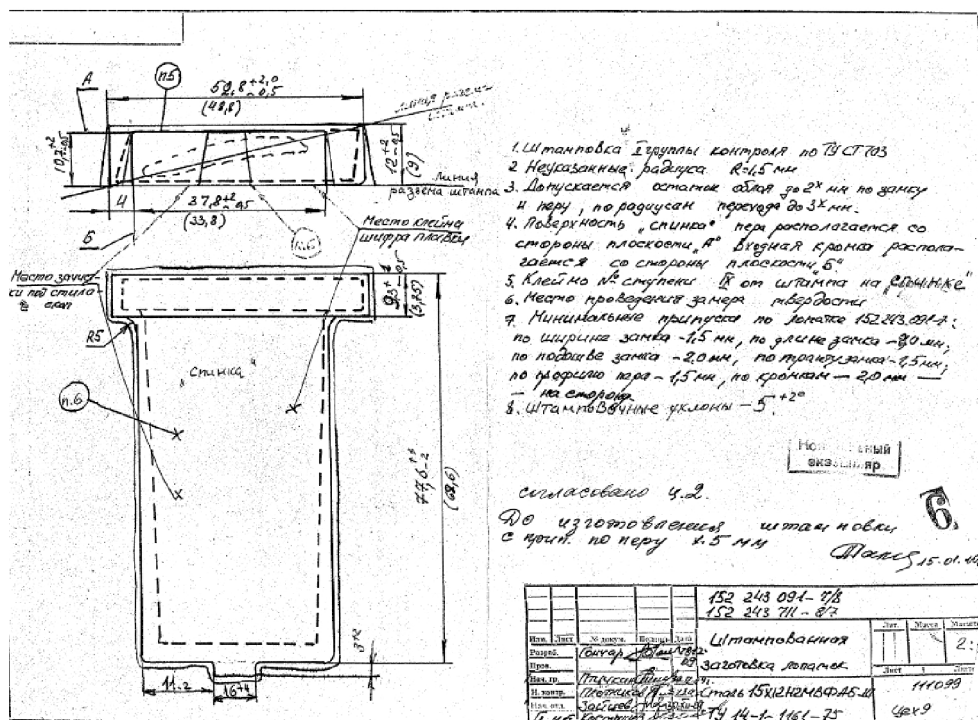


Рисунок 31 – Чертеж заготовки для лопатки 152.243.091-7/8

На чертеже выбраны оси относительно, которых нужно выставить 3D модель заготовки.

В результате совмещения осей получена 3D модель заготовки с размещённой внутри неё 3D моделью лопатки (рисунке 32).

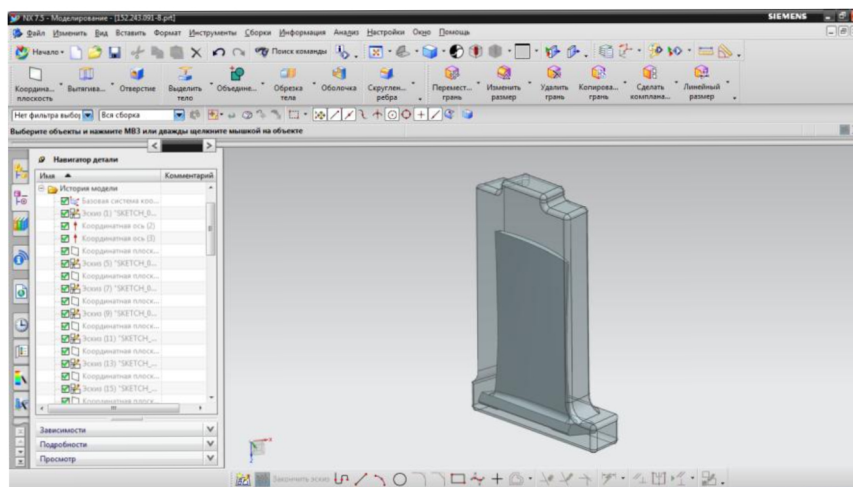


Рисунок 32 – Совмещенные 3D модели лопаток и заготовок

Следующим этапом является измерение припуска относительно всех точек 3D модели лопатки. Для этого были выявлены точки расположенные на наиболее удалённом расстоянии от оси лопатки. От этих точек были измерены минимальные расстояния до края заготовки (рисунок 33). Аналогичным образом осуществляется сравнение 3D моделей для других лопаток.

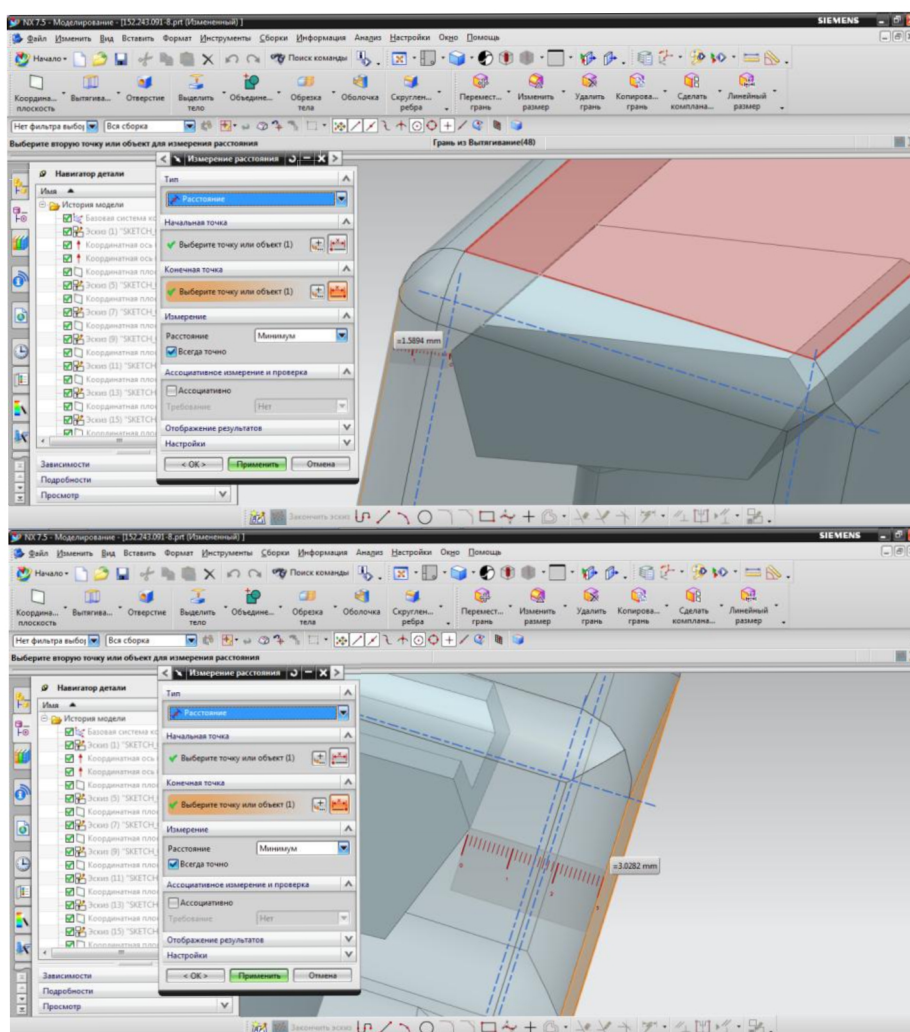


Рисунок 1.35 – Измерение минимального припуска

Лекция 3

Разработка стратегии инновационного изготовления лопаток КВД с использованием современного инструмента и оборудования

1 Обоснование последовательности обработки элементов лопатки и выбора инструмента

Для повышения эффективности фрезерной обработки компрессорных лопаток на современных станках с ЧПУ необходимо обеспечить ряд ключевых требований, существенно влияющих на технологический процесс:

1. Обеспечение максимально возможной жесткости заготовки и инструмента в процессе изготовления. На практике, это позволяет снизить вибрации в системе, как следствие, повысить интенсивность процесса резания, увеличить объемный съём металла и обеспечить возможность использования корпусного инструмента со сменными пластинами, что повышает экономическую эффективность всего технологического процесса.
2. Для чистовых операций применять монолитный инструмент с максимально возможным диаметром. В случае использования инструмента с малыми диаметрами (например, 3мм), необходимо чтобы державка фрезы имела выход на больший диаметр (например, 6мм).
3. В процессе обработки по возможности придерживаться принципа увеличения скорости резания и подачи за счёт снижения величины снимаемого припуска.

Разработанная технология предлагает изготовление коротких лопаток (длина которых не превышает 60 мм) с консольным креплением в технологической системе и применима для лопаток КВД 11 – 15 ступеней.

Предварительное моделирование процессов резания с использованием метода конечных элементов (МКЭ) показало принципиальную возможность данного способа изготовления, т.к. деформации в заготовке являются незначительными и фактически не влияют на точность полученных деталей.

Опытная отработка технологии изготовления лопаток проводилась на станке фирмы Mikron UCP 800 DURO с системой ЧПУ HEIDENHAIN TNC 530 оснащённым наклонно-поворотным столом (**рисунок 1**).



Рисунок 1 – Фрезерный обрабатывающий центр Mikron UCP 800 DURO

Основные этапы технологического процесса:

1. Удаление лишнего материала заготовки со стороны торца пера. Остаточный припуск по высоте лопатки остается в пределах 2.5 - 3.0 мм в зависимости от состояния поковки. Используется корпусной инструмент со съёмными пластинами для повышения производительности процесса обработки.
2. Окончательная обработка хвостовика типа «ласточкин хвост». Производится черновая и чистовая позиционная 5-ти осевая обработка всех поверхностей хвостовика.
3. Окончательная обработка пера лопатки с использованием непрерывной 5-ти координатной обработки.

Рассмотрим данный технологический процесс более подробно.

Предварительное снятие припуска с заготовки. Формирование упорной базы со стороны торца пера.

В качестве заготовки для изготовления предложенных лопаток последних ступеней компрессора используются штамповки из хромо-никелевого сплава ХН45МВТЮБР-ИД. Пример заготовки без предварительной обработки показан на **рисунке 2**.

В данной операции использовалась производительная корпусная фреза фирмы Walter (D32R1,2Z3),

где $D=32\text{мм}$ – диаметр фрезы;

$R=1,2\text{мм}$ – радиус при вершине;

$Z=3$ – количество режущих зубьев (пластин).



Рисунок 2 - Заготовка 152.253.111-3 лопатки КВД

Обозначение корпуса фрезы по каталогу F2330.T28.032.Z03.01,5co в патроне HSK63 AK530.H63A.T28.060 CO, сменными пластинами P26335R14 геометрии High Feed. Данные пластины из сплава WSM35 хорошо зарекомендовали себя при обработке титановых сплавов BT22. В данном случае (сплав ХН45МВТЮБР-ИД) обеспечивают работу со скоростями резания до 100-120 м/мин при вертикальном съеме до 0,5 мм и подаче на зуб до 0,8 мм. Указанные режимы резания позволяет быстро и эффективно удалить лишний припуск и подготовить заготовку для последующих операций. Время обработки лопатки 12 ступени ротора КВД (152.255.121) составило 5 минут.

Для закрепления заготовки используются прецизионные тиски с регулируемым усилием зажима. Заготовка зажимается в тисках с упором в необработанный торец хвостовика. Пример закрепления заготовки и её состояние после обработки представлены на **рисунке 3**.

Окончательная обработка хвостовика типа «ласточкин хвост»

Данная операция также проводится в универсальных тисках с упором в обработанный торец пера и служит для формирования поверхностей хвостовика лопатки. Обработка хвостовика производится с одного установа, что позволяет максимально сократить время необходимое на переналадку и повысить производительность процесса. Отсутствие чистовых поверхностей на заготовке позволяет исключить операцию базирования с использованием контактной измерительной системы станка и работать по наладке закрепления в приспособлении.

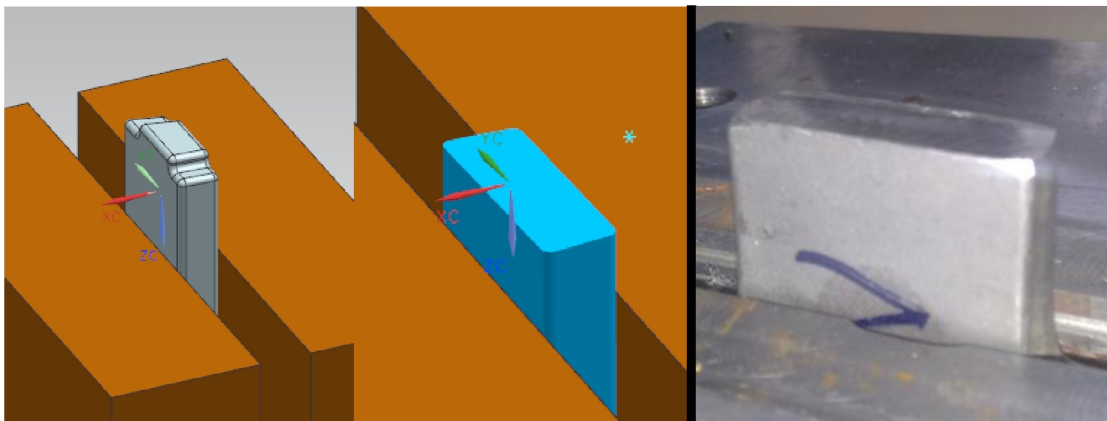


Рисунок 3 - Закрепление заготовки на первой операции

Черновая обработка также производится фрезой Walter (D32R1,2Z3) со сменными пластинами геометрии High Feed на режимах, схожих с предыдущим этапом обработки. На данном этапе происходит предварительное формирование поверхностей хвостовика с остаточным припуском 0,2 мм на скорости резания $V=100\text{ м/мин}$ ($n=1000\text{ об/мин}$) и рабочей подаче 2000 мм/мин.

Для формирования освобождения на хвостовике использовалась фреза F2330.T28.032.Z03.01,5 (ф. Walter) с пластинами P26335R14 (сплав WSM35). Геометрия фрезы и пластин в сборе позволяют сформировать освобождения за несколько проходов при скорости резания $V=60\text{ м/мин}$ ($n=1200\text{ об/мин}$) и рабочей подаче 200 мм/мин.

Чистовая обработка поверхностей хвостовика выполнялась монолитным инструментом. Экспериментально установлено, что для получения точности размеров и взаимного положения поверхностей (например, обеспечение угла ласточкина хвоста), удовлетворяющей конструкторским требованиям необходимо использовать концевую фрезу диаметром не менее 10 мм. Указанный диаметр фрезы позволяет получить необходимую жёсткость системы и исключить нежелательный эффект «отжатия» от обрабатываемой поверхности. На основании результатов испытаний монолитных твердосплавных фрез выбрана фреза R216.24-10050CCC22P 1620 фирмы Sandvik (D10R1Z4), показавшая наименьшие боковые усилия резания при испытании с режимами: $V=80\text{ м/мин}$, $F_z=0,15\text{ мм/зуб}$, $N=2500\text{ об/мин}$, $V_f=1500\text{ мм/мин}$, $A_p=0,1\text{ мм}$, $A_e=1\text{ мм}$.

Для обработки продольных и поперечных канавок на хвостовике лопатки выбрана сборная фреза ISCAR (D21,7R0,2Z4) с держателем из твёрдого сплава MM GRT 120C-T08 и сменой твердосплавной головкой MM GRIT 22K/P-2.5-0.20 на резьбовом соединении.

Время обработки хвостовика лопатки 12 ступени КВД составило 20 минут. Последовательность этапов обработки, а также вид заготовки с окончательно обработанным хвостовиком представлены на **рисунках 4, 5**.

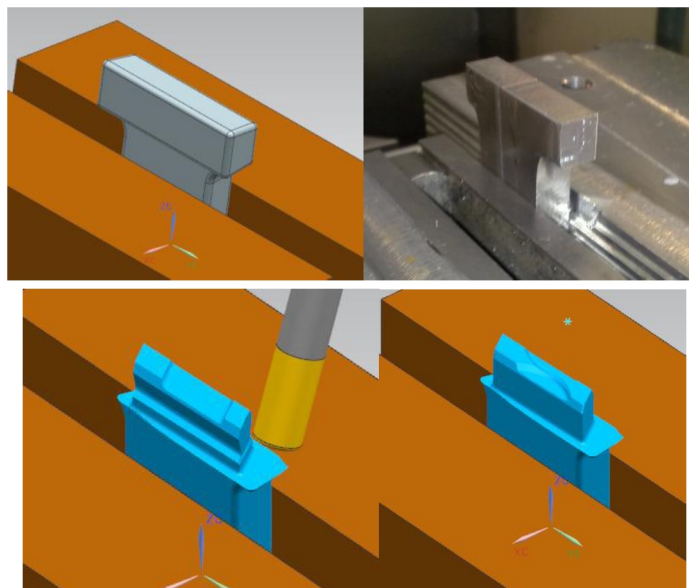


Рисунок 4 - Последовательная обработка хвостовика лопатки



Рисунок 5 – Готовый хвостовик лопатки

Обработка пера лопатки

Для обработки пера лопатки необходимо обеспечить беспрепятственный доступ обрабатывающего инструмента к любой точке поверхности пера, при этом обеспечив достаточную жесткость технологической системы.

С этой целью было разработано и изготовлено приспособление для закрепления лопатки за хвостовик. Проверка на повторяемость закрепления

показала, что данное приспособление позволяет базировать заготовку за хвостовик с погрешностью, не превышающей 0,015 мм на периферии пера. Базирование осуществляется по боковым опорным поверхностям хвостовика с упором в штифт торцевой поверхностью и поджимом в подошву винтом М8. Приспособление для закрепления заготовки изображено на **рисунке 6**.

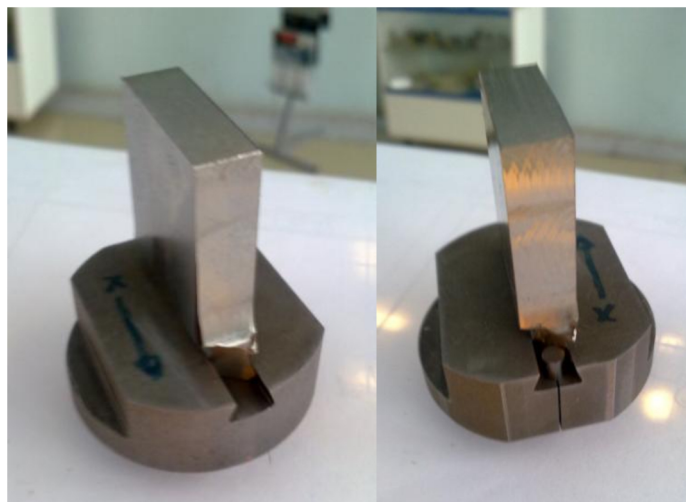


Рисунок 6 - Приспособление для закрепления заготовки за хвостовик

Для проведения 5-ти осевой обработки на станке Mikron UCP 800 DURO необходимо обеспечить безопасный доступ инструмента к поверхностям обработки и предотвратить столкновения рабочих органов станка. С этой целью целесообразно максимально поднять заготовку над уровнем поворотного стола станка. Однако при увеличении высоты приспособления снижается жесткость системы крепления. Таким образом, необходимо подобрать минимально возможную высоту, обеспечивающую реализацию траектории движения без столкновения рабочих органов. Экспериментально было определено, что высота приспособления должна соответствовать величине 100 мм над поверхностью стола. Схема крепления экспериментального приспособления показана на **рисунке 7**.



Рисунок 7 - Установка приспособления на поворотном столе станка Mikron UCP 800 DURO

Процесс базирования приспособления производится с использованием контактной измерительной системы станка: определяется разворот установленного приспособления в плоскости рабочего стола и производится привязка к пазу «ласточкин хвост».

Процесс обработки состоит из двух этапов:

1. Предварительная обработка пера лопатки (выравнивание припуска) корпусной фрезой ф. Walter (D32R1,2Z3) со сменными пластинами геометрии High Feed. На данном этапе производится съём поверхностного слоя и выравнивание припуска по перу. По окончании операции величина припуска составляет 2 мм на сторону. Время обработки на черновой операции лопатки 12 ступени КВД (152.255.121) составило 7 минут. Процесс обработки и результат представлен на **рисунке 8**.



Рисунок 8 - Черновая обработка пера лопатки

2. Чистовая обработка состоит из двух последовательных переходов:

- **обработка пера сборной фрезой Walter (D12R1Z6)**, которая включает держатель AK610.Z12.E12.022 и сменную твердосплавную головку H3E23138-E12-12-1. Выбор данной фрезы обусловлен увеличенным количеством зубьев, позволяющим работать с большей производительностью. Сменная головка обеспечивает более экономное использование твердосплавного инструмента и соответственно экономию для наиболее продолжительной и ответственной части операции. Время черновой обработки пера лопатки 12 ступени КВД (152.255.121) составило 38 минут.

- **обработка прикомлевого участка лопатки сферической фрезой Walter H8011118-3 (D3R1,5Z2)** с переходом на диаметр 6мм для обеспечения жесткости инструмента, время обработки составило 20 минут.

Данные переходы выполнены на станке с помощью контурных пятиосевых траекторий. Фрагменты обработки представлены на **рисунке 9**.



Рисунок 9 - Финишная обработка пера и прикомлевого участка лопатки

На основе экспериментальных исследований был разработан технологический процесс изготовления лопатки компрессора из штампованной заготовки с минимальным числом установов, обеспечивающий требуемую геометрическую точность и высокое качество поверхности пера и хвостовика без ручной доработки. Суммарное время обработки лопатки 12 ступени КВД (152.255.121) из штампованной заготовки составило 90 минут.

2 Анализ деформации профиля пера лопатки КВД в программе ANSYS

Для анализа влияния сил резания при 5-ти координатной обработке профиля пера лопатки (152.255.121) на точность получаемой поверхности. использовались программные комплексы **Siemens NX** и **ANSYS**. Силы резания рассчитывались по эмпирическим формулам, а затем выполнялась проверка их воздействия на перо лопатки в процессе обработки. Силы прикладывались на периферийном участке пера (вблизи входных и выходных кромок), так как на этих участках по опытным данным наблюдалось наибольшее отклонение от заданного профиля.

Расчёт сил резания при обработке профиля пера лопатки

Базирование заготовки осуществлялось по предварительно обработанному замку лопатки (по боковым поверхностям хвостовика с упором в торец) (рисунок 10).

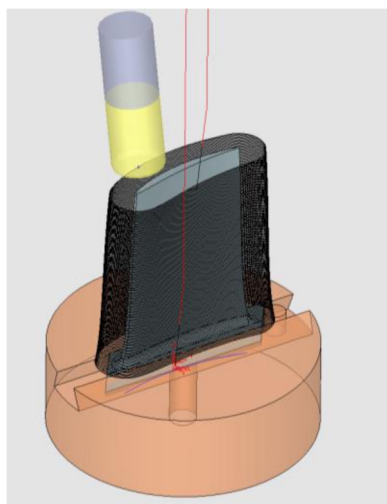


Рисунок 10 - Модель обработки пера лопатки

Обработка пера проводилась концевой фрезой Ø 10 мм с радиусом при вершине кромки 1 мм по спирали с шагом 0,2 мм. Ось фрезы наклонена на 7° относительно горизонтальной плоскости, поэтому обработка осуществляется радиусом фрезы. На рисунке 11 приведена расчётная модель заготовки лопатки в момент обработки входной кромки.

Расчёт окружной силы резания выполнялся по формуле [1]:

$$P_z = \frac{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot S_z^y \cdot B^u \cdot z}{D^Q \cdot n^w} \cdot K_{MP} \quad ,$$

где C_p – коэффициент окружной силы резания, $C_p=218$, так как производит-

ся обработка никелевого сплава ХН45НВТЮБР-ИД твёрдосплавной фрезой [2, табл. 41];

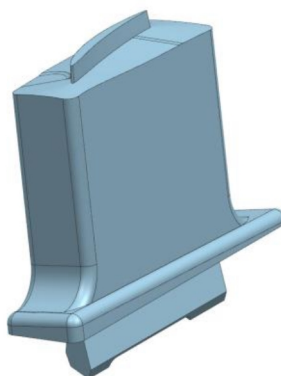


Рисунок 11 - Расчётная модель заготовки

X, Y, U, Q, W – коэффициенты, $X=0,92, Y=0,78, U=1, Q=1,15, W=0$ [2, табл. 41];

t – глубина резания, $t=0,2$ мм, согласно выбранной стратегии обработки;

B – ширина резания, $B=8,5$ мм, на участках входных кромок ширина резания достигает максимальных значений;

z – количество зубьев у фрезы, $z=4$;

D – диаметр фрезы, $D=10$ мм;

n – частота вращения фрезы, $n=2069$ об/мин, согласно режимам обработки, выбранным по каталогу фирмы производителя;

S_Z – подача на один зуб фрезы, рассчитывается по формуле:

$$S_Z = \frac{S_M}{z \cdot n},$$

где S_M – минутная подача, $S_M=500$ мм/мин, согласно режимам обработки, выбранным по каталогу;

Тогда $S_Z=0,06$ мм/зуб;

K_{MP} – коэффициент, учитывающий влияние материала, находится по формуле:

$$K_{MP} = \left(\frac{\sigma_B}{750} \right)^{0,3},$$

где σ_B – предел выносливости материала, $\sigma_B=1325$ МПа.

Тогда $K_{MP}=1,19$.

Подставив все значения в формулу, получим:

$$P_z = \frac{10 \cdot 218 \cdot 0,2^{0,92} \cdot 0,06^{0,78} \cdot 8,5 \cdot 4}{10^{1,15}} \cdot 1,19 = 158,61 \text{ Н}.$$

Тогда $P_y = 0,5 \cdot P_z = 0,5 \cdot 158,61 = 79,3 \text{ Н}$. Влияние силы P_x ничтожно мало, поэтому она не учитывалась при расчёте.

На следующем шаге выполнения работы в соответствии с направлением усилий резания (**рисунок 12**) с помощью специальных маркеров была создана и сориентирована вспомогательная система координат (**рисунок 13**), а затем сохранена (*Панель меню* → *Формат* → *РСК* → *Сохранить*).

Для начала расчёта данная модель была разбита на сетку конечных элементов. Для этого нужно было перейти в модуль «Расширенная Симуляция» ( Начало ▾ →  Расширенная симуляция...) и в навигаторе симуляции по правой кнопке мыши выбрать  Новый FEM..., в появившемся окне найти шаблон **Ansys**, ввести латиницей название будущего файла и указать место для сохранения файла на жёстком диске компьютера (в пути к файлу не должно быть русских букв).

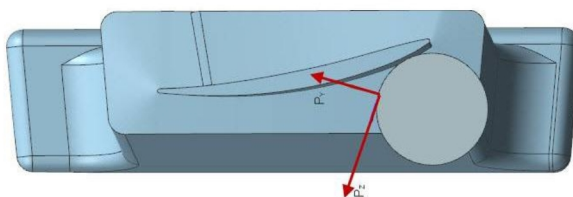


Рисунок 12 - Направление составляющих сил резания

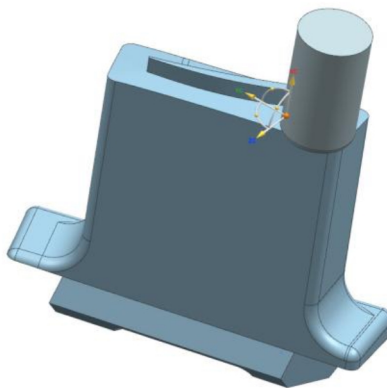


Рисунок 13 - Оси координат и составляющие усилий резания

Во вновь открывшемся окне (**рисунок 14**) нужно выбрать опции геометрии и отметить «Системы координат», далее убедиться, что в **Решателе** выбран **Ansys**, а тип анализа – структурный. Полученная модель сетки параметрически связана с исходной моделью.

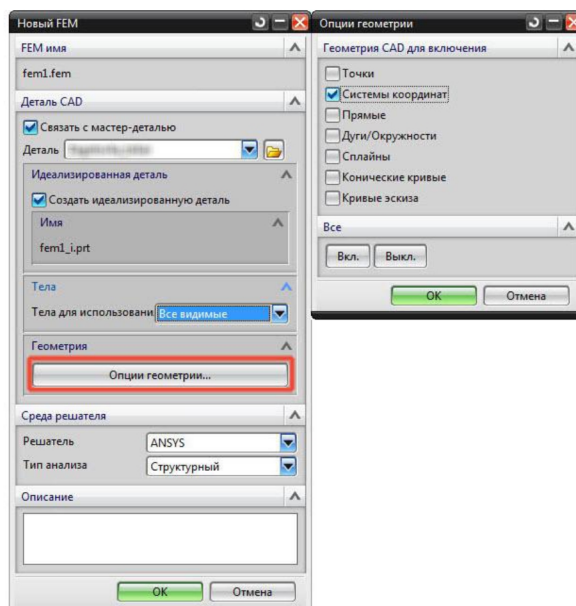


Рисунок 14 - Окно выбора типа анализа

Затем модели необходимо присвоить **материал**. На панели меню нажимаем кнопку «**Назначить материал**» , выбираем курсором тело и в списке находим *Steel* (рисунок 15). Данный материал нам полностью подходит для расчёта, в нем содержатся данные по плотности, модулю Юнга и коэффициенту Пуассона. Также в данном окне есть возможность править данные, нажав на кнопку «**Проверить материал**» .

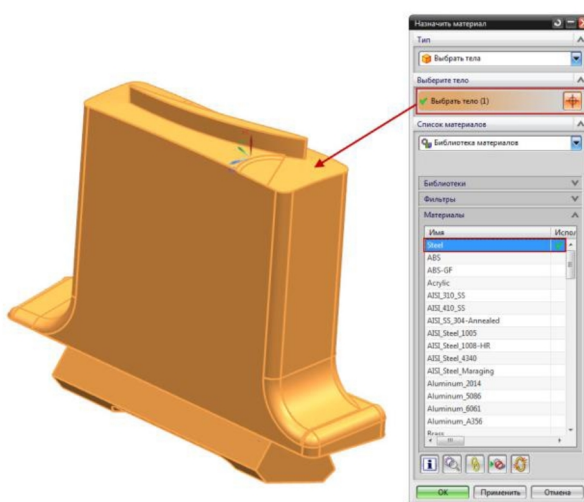


Рисунок 15 - Окно выбора материала

Для данного типа расчёта целесообразно использовать свободную сетку, которая вызывается в данное меню нажатием кнопки «**3D тетраэдральная сетка**»  (рисунок 16).

Для решения данной задачи подходит элемент SOLID92. Он является квадратичным элементом (II порядка), пригодным для моделирования нерегулярных сеток (создаваемых при импорте геометрической информации из

различных комплексов CAD).

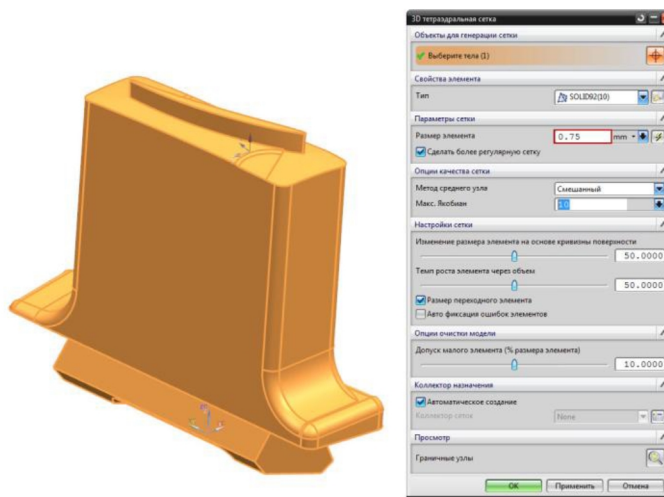


Рисунок 16 - Окно выбора размера и типа элемента

Элемент определяется десятью узлами, имеющими три степени свободы в каждом узле: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат. Элемент имеет свойства пластичности, ползучести, радиационного набухания, изменения жёсткости при приложении нагрузок, больших перемещений и больших деформаций.

Затем необходимо задать размер элемента. При этом нужно учитывать, что в самом узком месте модели, для точного расчёта, должно быть не менее трёх рядов элементов. Соответственно сначала измеряется длина, делится на 3, округляется и вносится в поле меню. В данной работе оптимальным подобран размер элемента **0,75 мм**. Размер сетки и тип элемента всегда можно поменять в «**Навигаторе Симуляции**». Остальные значения были оставлены неизменными. После нажатия кнопки **OK** происходит разбиение модели на сетку конечных элементов.

В модуле **Siemens NX** были выполнены все процедуры, для продолжения решения необходимо перейти в меню «**Новая симуляция**». Для этого курсор наводится на название файла сетки в «**Навигаторе Симуляции**» и по правой кнопки мыши выбирается пункт «**Новая симуляция**» (рисунок 17).

В появившемся меню выбирается шаблон **Ansys**, вводится название файла и указывается путь. После нажатия **OK** появляется меню «**Новой симуляции**» (рисунок 18). В нём всё оставляется без изменения и нажимается **OK**.

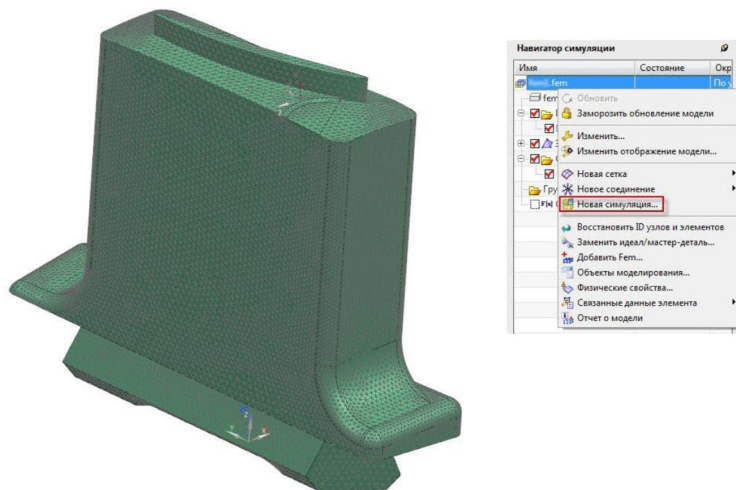


Рисунок 17 - Выбор пункта «Новая симуляция»

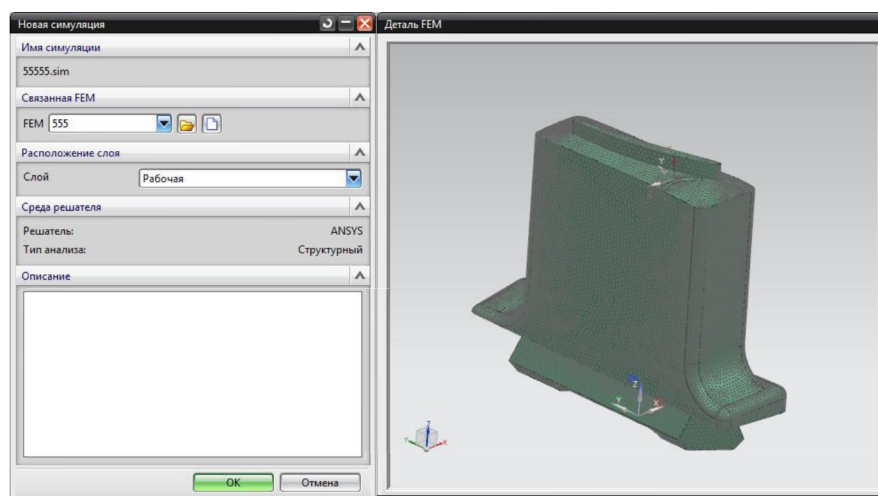


Рисунок 18 - Окно меню «Новая симуляция»

Затем появляется меню «**Решение**» (рисунок 19). Данное меню предназначено для выбора анализа и ввода начальных условий (температура окружающей среды, количество итераций решения и т.д.). В нём необходимо убедиться, что в качестве решателя выбран **ANSYS**, тип анализа - структурный, тип решения – линейная статика и нажимается **OK**.

На следующем шаге необходимо задать ограничения или иначе граничные условия. Так как обработка ведется в специальном приспособлении то нужно ввести такие ограничения, которые симитируют данный тип закрепления. Для этого на панели меню находится кнопка «Заделка», в «Панели выбора» ставится фильтр – «Фасетные грани» и выбираются грани хвостовика зажимаемые в приспособлении (рисунок 20).

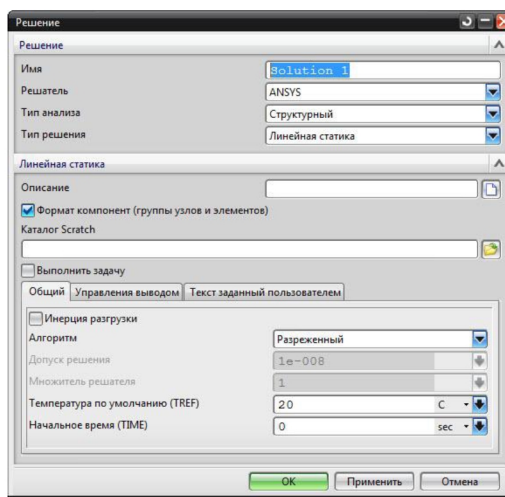


Рисунок 19 - Окно меню «Решение»

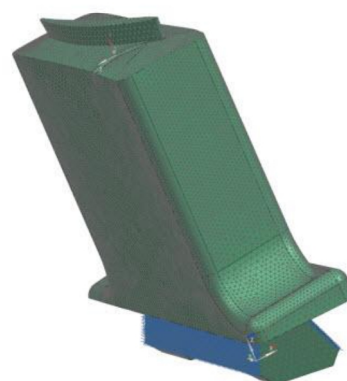
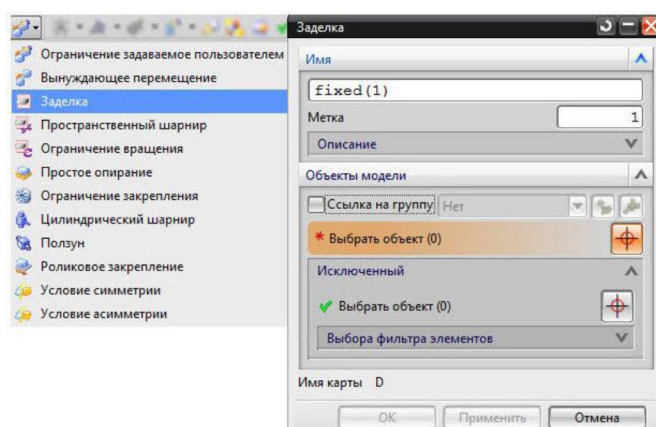


Рисунок 20 - Последовательность задания ограничений

Теперь требуется приложить усилие резания к грани. Для этого на панели меню находится кнопка «**Тип нагрузки**», выбирается «**Сила**». В появившемся окне находится вкладка «**Тип**» и выбирается в контекстном меню «**Компоненты**», так как сила резания состоит из трёх составляющих. Затем на «**Панели выбора**» ставится фильтр «**Фасетная грань**» и выбирается грань, к которой будет приложена нагрузка (в конкретном случае это радиус образующей фрезой). Далее необходимо задать направление составляющих силы, для этого нужно перейти на вкладку «**Направление**», в контекстном меню «**СК**» выбрать «**Декартовы**», в меню «**Локальные**» найти «**СК объекта**» и активизировать созданную ранее вспомогательную систему координат. Теперь осталось ввести значения составляющих силы, соответственно для X задается 0 , $Y - 79,3 \text{ Н}$, а для $Z - 158,61 \text{ Н}$ (рисунок 21).

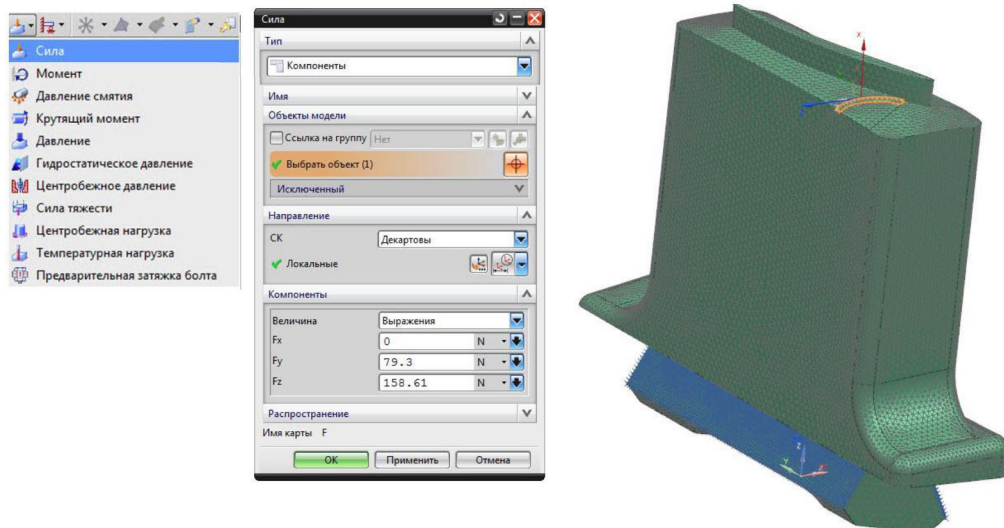


Рисунок 21 - Последовательность приложения нагрузок
 Затем был подключен решатель, для этого на компьютере был установлен **Ansys**. В «Переменных средах» Windows была создана системная переменная с именем **UGII_ANSYS**, а в качестве значения был указан путь до запускаемого файла **ANSYS.EXE** (рисунок 22).

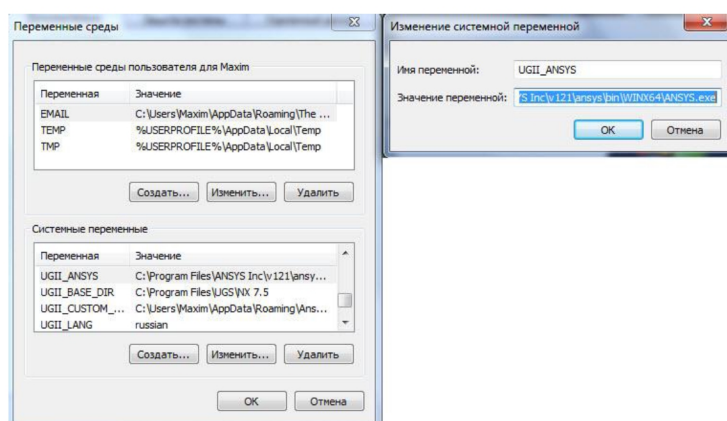


Рисунок 22 - Создание переменной UGII_ANSYS

После выполнения этой процедуры **Windows** перезагружается. Переходим в меню «**Решение**», заходим в изменение параметров **решателя** и убеждаемся, что выбран пункт «**Использовать системную переменную UGII ANSYS**» (рисунок 23).

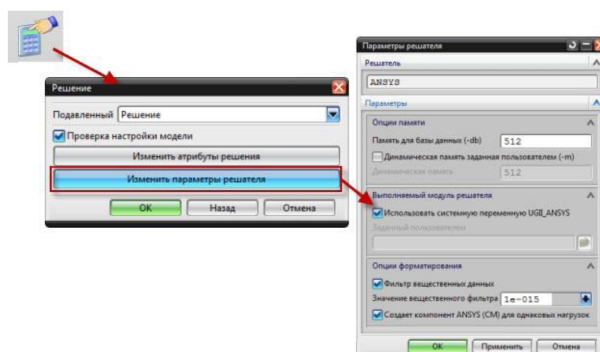


Рисунок 23 - Окно решателя

Затем в меню «**Решение**» вызываем окно **анализа расчета**, показываю-

щее состояние выполнения процесса. Решение закончится, когда появится надпись «**Completed**» (рисунок 24).

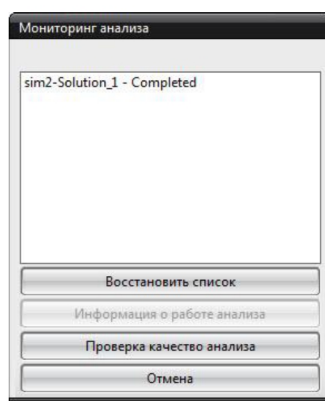


Рисунок 24 - Окно Мониторинга анализа

Перемещаемся в «**Навигатор постпроцессора**», чтобы просмотреть полученные результаты (рисунок 25).

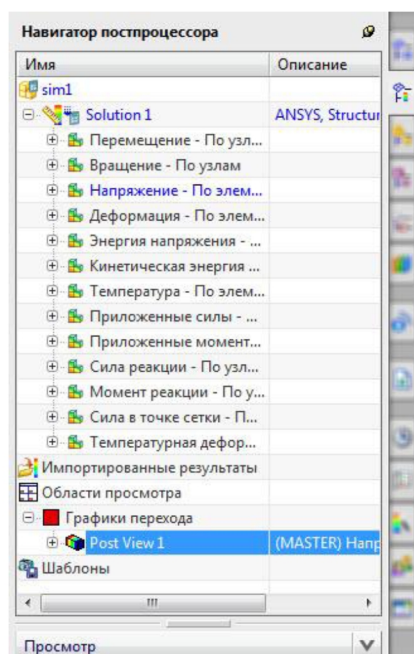


Рисунок 25 - Навигатор постпроцессора

Примечание: для правильного отображения русских шрифтов в окне постпроцессора необходимо проделать следующие операции: **Панель меню → Файл → Утилиты → Настройки по умолчанию → Симуляция → Постпроцессор → Шрифт → Cyrillicf**.

Затем нужно перейти в пункт «**Перемещение по узлам**» и выбрать **Magnitude** (общее перемещение). Максимальное значение на данной картине не должно превышать допуска на операцию. В данном случае максимальное значение составляет **0,01127 мм** и не превышает допуск на размер **0,05 мм** (рисунок 26).

exp1_sim1 : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.000E+000, Макс. : 1.127E-002, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

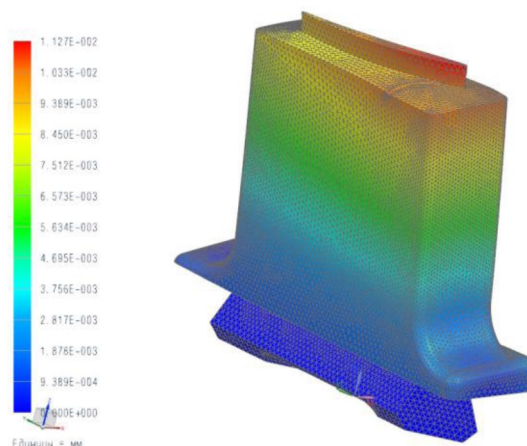


Рисунок 26 - Картина общих перемещений при обработке входной кромки

Далее необходимо переместиться в пункт «Напряжение по элементам\узлам» и выбирать **Von-Mises** (условие пластичности Мизеса). Максимальное значение на данной картине не должно превышать предела текучести материала. В нашем случае максимальное значение составляет **155,69 МПа** и не превышает предела выносливости сплава ХН45НВТЮБР-ИД **883 МПа** (рисунок 27).

exp1_sim1 : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементам/узлам, Без лебереджа, Von-Мизес
 Мин. : 0.00, Макс. : 155.69, Единицы = N/mm^2(MPa)
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

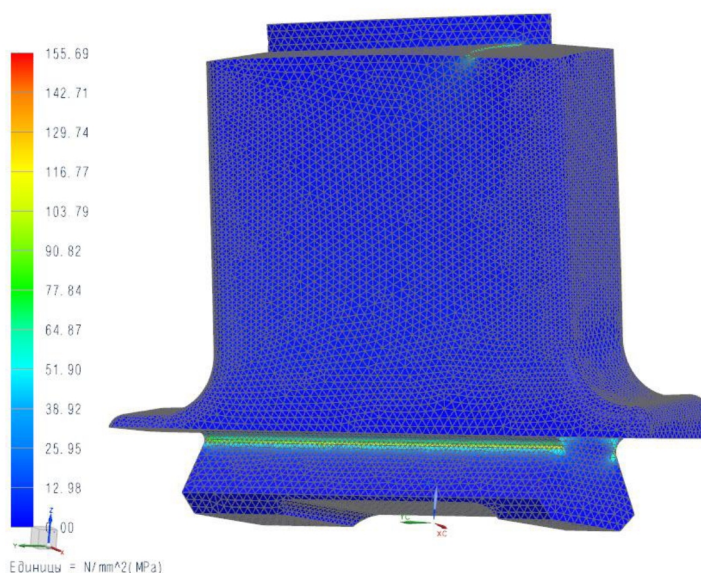


Рисунок 27 - Картина общих напряжений при обработке входной кромки

На следующем этапе были проделаны все описанные выше операции для модели обработки выходной кромки. В результате получены картины перемещений (рисунок 28) и напряжений (рисунок 29), из которых следует, что максимальные отклонения от размеров достигают **0,0018 мм**, а макси-

мальные напряжения **181,75 МПа**.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что усилия резания, возникающие на данной операции, не влияют на точность получаемой при обработке поверхности.

Далее по вышеизложенной методике были рассчитаны модели обработки для входных и выходных кромок с изменением глубины резания (0,3 мм; 0,4 мм; 0,5 мм; 0,6 мм). Результаты приведены на **рисунках 30-45**.

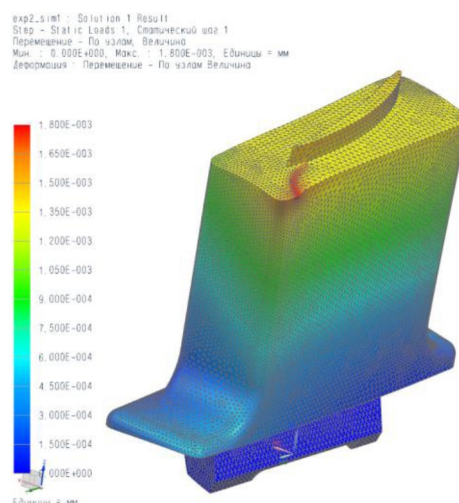


Рисунок 28 - Картина общих перемещений при обработке выходной кромки

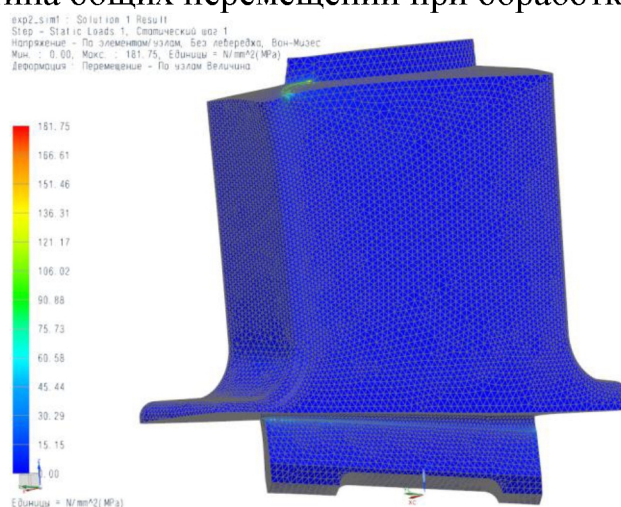


Рисунок 29 - Картина общих напряжений при обработке выходной кромки

03.sim.vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Столбчатый шаг 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.0000, Макс. : 0.0164, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

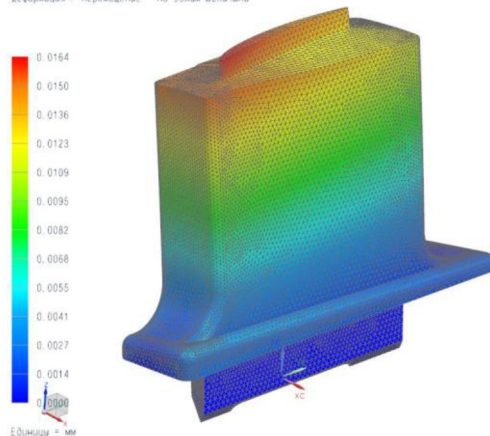


Рисунок 30 - Картина общих перемещений при обработке входной кромки при глубине резания 0,3 мм

03.sim.vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Столбчатый шаг 1
 Напряжение - По элементам/узлам, Без леберейжа, Ван-Мизеса
 Мин. : 0.00, Макс. : 223.26, Единицы = Н/мм² (МПа)
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

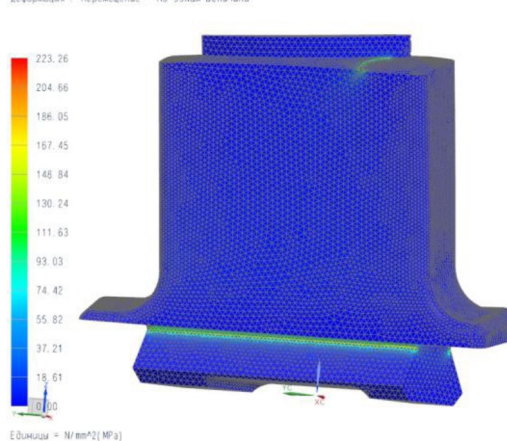


Рисунок 31 - Картина общих напряжений при обработке входной кромки при глубине резания 0,3 мм

03.sim.vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Столбчатый шаг 1
 Перемещение - По узлам, Величина
 Мин. : 0.0000, Макс. : 0.0120, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлам Величина

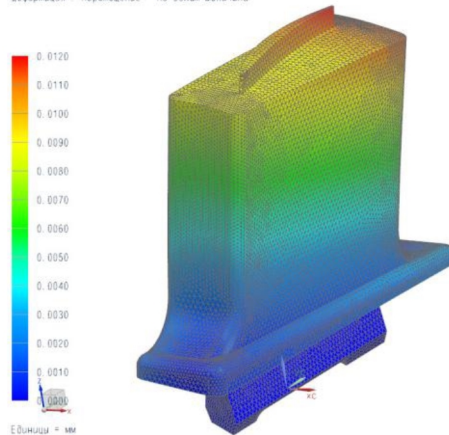


Рисунок 32 - Картина общих перемещений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,3 мм

03.sim : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементу/узлом, Без леберейко, Вон-Мизес
 Мин. : 0.00, Макс. : 296.90, Единицы : N/mm²(MPa)
 Деформация : Перемещение - По узлом Величина

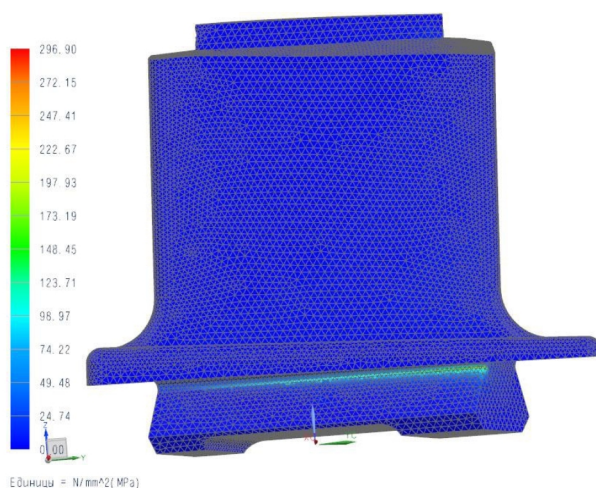


Рисунок 33 - Картина общих напряжений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,3 мм

04.sim_vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Перемещение - По узлом, Величина
 Мин. : 0.0000, Макс. : 0.0213, Единицы : мм
 Деформация : Перемещение - По узлом Величина

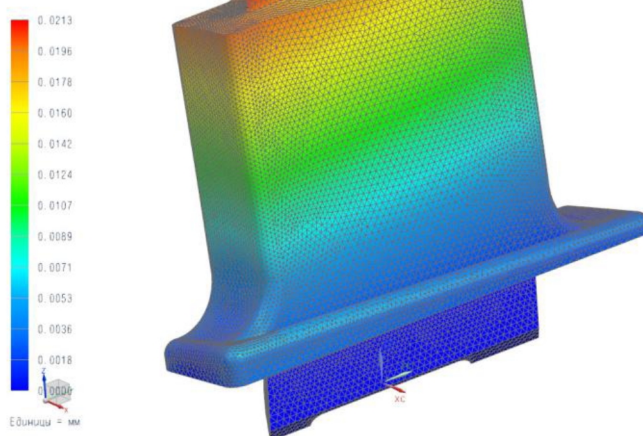


Рисунок 34 - Картина общих перемещений при обработке входной кромки при глубине резания 0,4 мм

04.sim_vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементу/узлом, Без леберейко, Вон-Мизес
 Мин. : 0.00, Макс. : 290.92, Единицы : N/mm²(MPa)
 Деформация : Перемещение - По узлом Величина

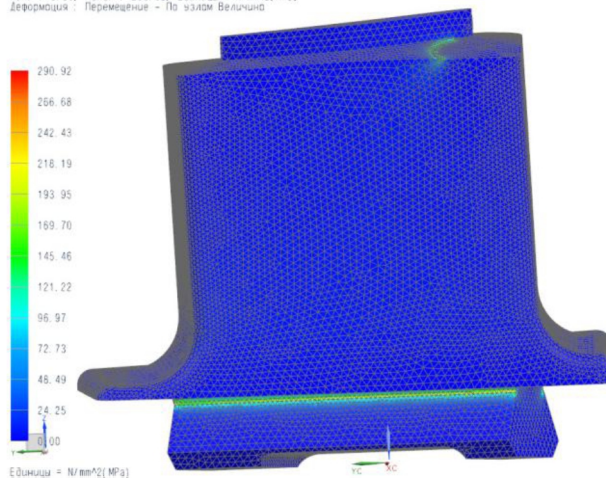


Рисунок 35 - Картина общих напряжений при обработке входной кромки при глубине резания 0,4 мм

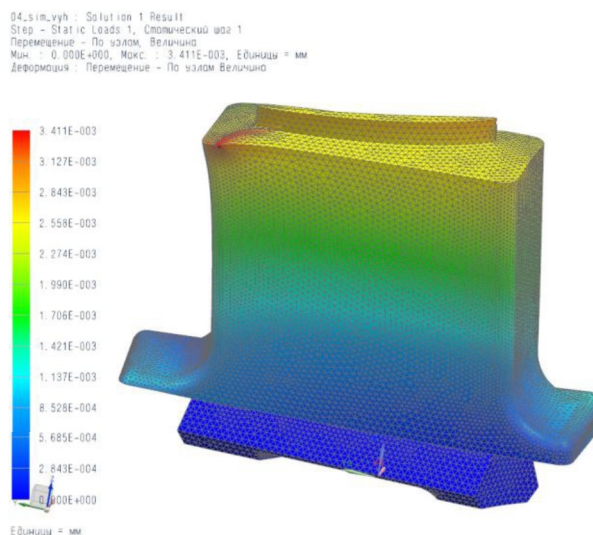


Рисунок 36 - Картина общих перемещений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,4 мм

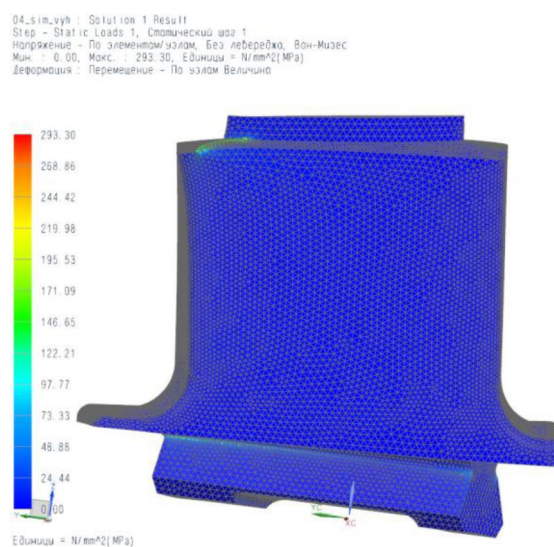


Рисунок 37 - Картина общих напряжений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,4 мм

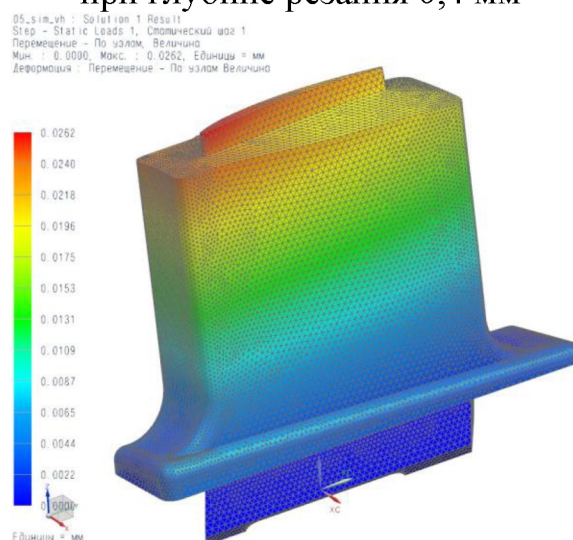


Рисунок 38 - Картина общих перемещений при обработке входной кромки при глубине резания 0,5 мм

05.sim.vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементу/узлом, Без леверейка, Ван-Мизес
 Мин. : 0.00, Макс. : 352.05, Единицы = N/mm²(MPa)
 Деформация : Перемещение - По узлом Величина

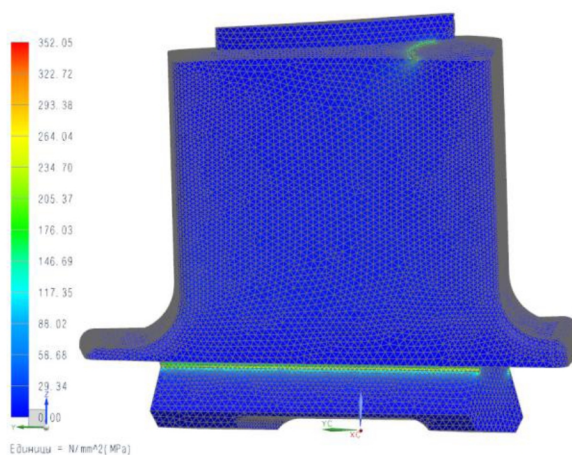


Рисунок 39 - Картина общих напряжений при обработке входной кромки при глубине резания 0,5 мм

05.sim.vyh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Перемещение - По узлом, Величина
 Мин. : 0.000E+000, Макс. : 4.188E-003, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По узлом Величина

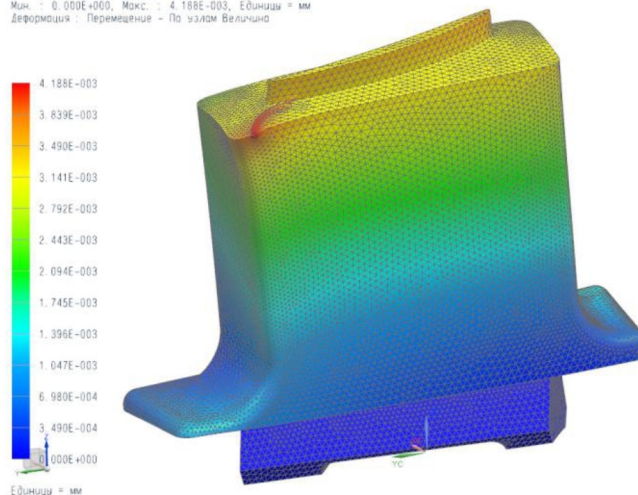


Рисунок 40 - Картина общих перемещений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,5 мм

05.sim.vuh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Статический шаг 1
 Напряжение - По элементу/узлом, Без леверейка, Ван-Мизес
 Мин. : 0.00, Макс. : 360.13, Единицы = N/mm²(MPa)
 Деформация : Перемещение - По узлом Величина

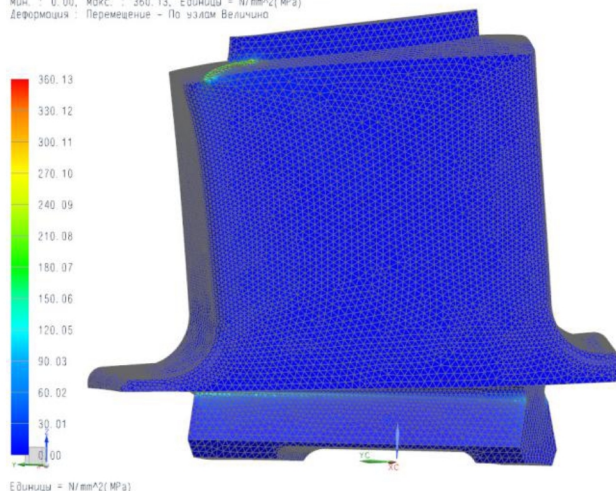


Рисунок 41 - Картина общих напряжений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,5 мм

06.sim.vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Столбчатый шаг 1
 Перемещение - По излом, Величина
 Мин. : 0.0000, Макс. : 0.0310, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По излом Величина

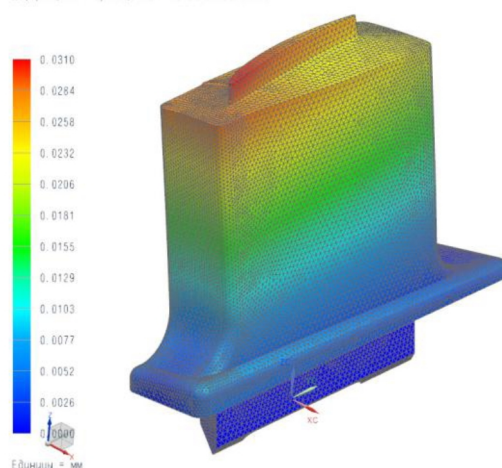


Рисунок 42 - Картина общих перемещений при обработке входной кромки при глубине резания 0,6 мм

06.sim.vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Столбчатый шаг 1
 Напряжения - По элементному излом, Без ячеерейка, Вон-Мизес
 Мин. : 0.00, Макс. : 416.35, Единицы = N/mm²(MPa)
 Деформация : Перемещение - По излом Величина

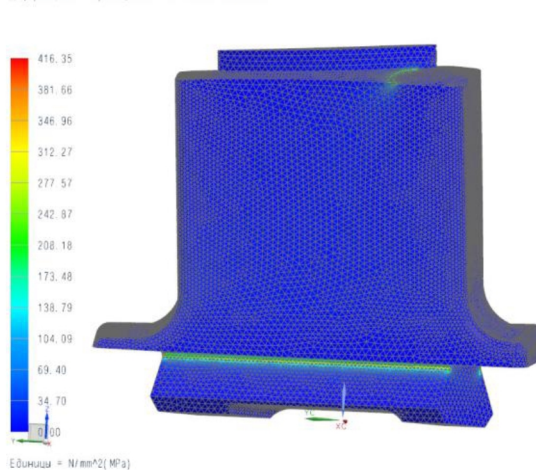


Рисунок 43 - Картина общих напряжений при обработке входной кромки при глубине резания 0,6 мм

06.sim.vh : Solution 1 Result
 Step - Static Loads 1, Столбчатый шаг 1
 Перемещение - По излом, Величина
 Мин. : 0.000E+000, Макс. : 4.953E-003, Единицы = мм
 Деформация : Перемещение - По излом Величина

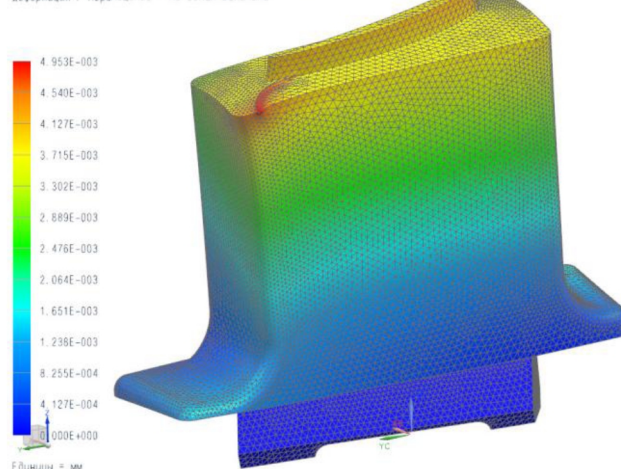


Рисунок 44 - Картина общих перемещений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,6 мм

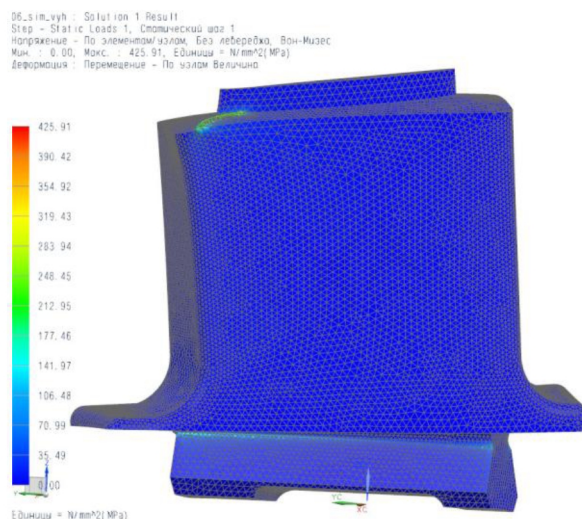


Рисунок 45 - Картина общих напряжений при обработке выходной кромки при глубине резания 0,6 мм

На основании выполненных расчётов были построены графики зависимости максимальных перемещений от глубины резания для входной (рисунок 46) и выходной кромок (рисунок 47).

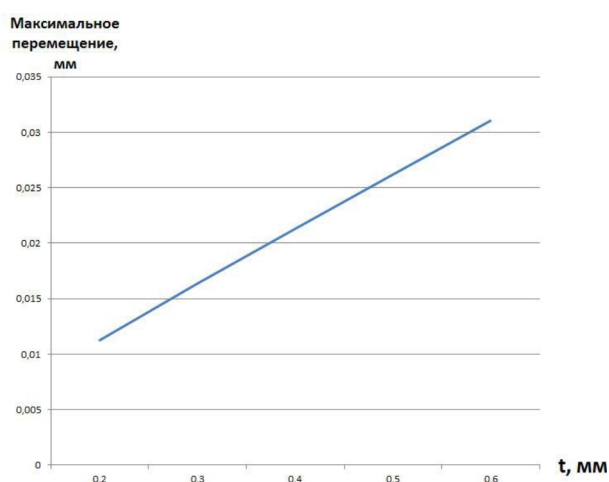


Рисунок 46 - Зависимость максимального перемещения от глубины резания для входной кромки лопатки

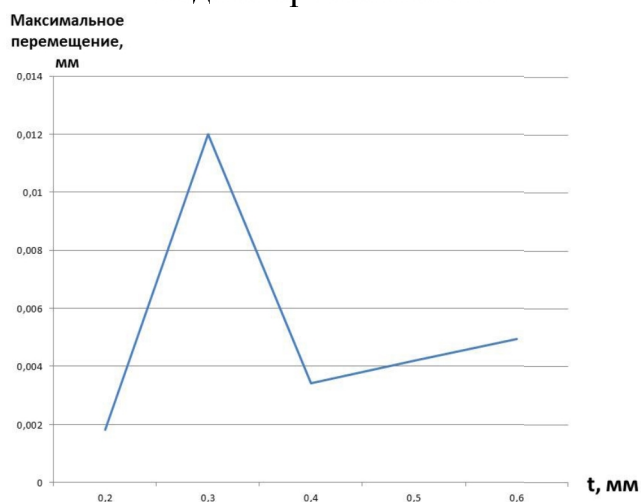


Рисунок 47 - Зависимость максимального перемещения от глубины резания для выходной кромки лопатки

Рисунок 49 - Карта наладки інструмента (замок лопатки)

Операционная карта		N цеха	Обозначение детали (узел)	N опер.	Наименование операции	Марка материала	Форм. 28
					Фрезерный с ЧПУ (обработка замка лопатки)	ХН45МВТ06Р-ИД (ЭИ718-ИД)	Твердость
Оборудование	Охлаждение	Разр.	Норма обл.	Т. маш.	Инструкция по ТБ		
Micron UCP-800 DURO	Эмульсия				Тара		

NN пер.	Содержание перехода	Приспособление	Инструмент		Режим обработки		
			режущий	измерительный	i	S	n
1	Установить деталь в приспособление и закрепить	Спец. приспособ. СТАУ					
2	Фрезеровать по программе: Предварительно с остаточным припуском 0.2 мм.		F2330.T28032.203.015			2000	935
3	Фрезеровать по программе: - торцевые поверхности хвостовика - плечу - фаски ласточкиного хвоста - опорные поверхности		R216.24-100050CCC.22P			500	2000
4	Фрезеровать по программе: выточку на плече хвостовика		98025-MEGA			350	7600

Nº	Шифр	a	b	c	d	e	f	r	g
01	152.255.121-1	3	1.5 ^{+0.2}	1.2	9	6.816	4	1.6 ^{-0.3}	1.8 ^{+0.12}
02	152.255.101-1	3	1.5 ^{+0.2}	1.2	10	7.816	6	1.6 ^{-0.3}	1.8 ^{+0.12}
03	152.255.151	3	1.6 ^{+0.2}	1.5 ^{+0.2}	9	6.816	4	0.3 ^{-0.1}	2 ^{+0.12}
04	152.255.121	3	1.5 ^{+0.2}	1.2	9	6.816	4	1.6 ^{-0.3}	-
05	152.255.101	3	1.5 ^{+0.2}	1.2	10	7.816	6	1.6 ^{-0.3}	-

Изм. (N докум.)	Фамилия	Подпись	Дата	Изм. (N докум.)	Фамилия	Подпись	Дата
Технолог	Кузнецов			Нач. БТК			
Нач. ТБС	Сиркоб			Н. Контроль			
Нач. цеха	Кузнецов			Гл. технолог			

Рисунок 50 - Операционная карта изготовления замка

Операционная карта		N цеха	Обозначение детали (узел)	N опер.	Наименование операции	Марка материала	Форм. 28
					Фрезерный с ЧПУ (обработка пера лопатки)	ХН45МВТ06Р-ИД (ЭИ718-ИД)	Твердость
Оборудование	Охлаждение	Разр.	Норма обл.	Т. маш.	Инструкция по ТБ		
Micron UCP-800 DURO	Эмульсия				Тара		

NN пер.	Содержание перехода	Приспособление	Инструмент		Режим обработки		
			режущий	измерительный	i	S	n
1	Установить деталь в приспособление и закрепить	Спец. приспособ. СТАУ					
2	Фрезеровать по программе: предварительно с остаточным припуском 2 мм.		F2330.T28032.203.015			2000	935
3	Фрезеровать по программе: - верхний торец пера - пера написто		R216.24-100050CCC.22P			500	2000
4	Фрезеровать по программе: прикрепить часть пера		H801118-3			400	7500

Nº	Шифр	A1-A1	A2-A2	A3-A3	A4-A4	A5-A5	A6-A6	A7-A7
01	152.255.121-1	44.9	40.4	30.4	20.4	10.4	4.9	-
02	152.255.101-1	59.0	52.5	42.5	32.5	22.5	12.5	5.5
03	152.255.151	34.5	28.5	23.5	18.5	13.5	8.5	5
04	152.255.121	44.9	40.4	30.4	20.4	10.4	4.9	-
05	152.255.101	59.0	52.5	42.5	32.5	22.5	12.5	5.5

Изм. (N докум.)	Фамилия	Подпись	Дата	Изм. (N докум.)	Фамилия	Подпись	Дата
Технолог	Кузнецов			Нач. БТК			
Нач. ТБС	Сиркоб			Н. Контроль			
Нач. цеха	Кузнецов			Гл. технолог			

Рисунок 51 - Операционная карта изготовления пера лопатки

Операционная карта				N детали	Обозначение детали (шп.)	N опер.	Наименование операции	Марка материала	Марка ШП
Оборудование				Охлаждение	Разр.	Норма обл.	Т. маш.	Инструкция по ТБ	Тара
Micron UCP-800 DURO				Эмульсия					

NN пер.	Содержание перехода	Присто- соедине	Инструмент		Режим обработки		
			режущий	интермитный	i	S	n
1	Установить деталь в приспособление и закрепить	Спец. приспособ. ЦАЭ					
2	Фрезеровать по программе: Предварительно с остаточным припуском 0,2 мм	F2330.T28.032.203 015			2000	935	
3	Фрезеровать по программе: - торцевые поверхности - плоские поверхности - фаски лопаточного хвоста - опорные поверхности	R216.24-10005000 22P			500	2000	
4	Фрезеровать по программе: выборку на петле - хвостовика	98025-MESA			350	7600	

Nº	Шифр	a	b	c	d	e	f	r
01	152.243.091-7	2	0.8 ^{+0.2/-0.2}	0.6 ^{+0.1/-0.1}	9	7.544	6.5 ^{+0.2/-0.2}	1
02	152.243.091-8	2	0.8 ^{+0.2/-0.2}	0.6 ^{+0.1/-0.1}	9	7.544	6.5 ^{+0.2/-0.2}	1

Изм.	И. доп.	Фамилия	Подпись	Дата	Изм.	И. доп.	Фамилия	Подпись	Дата	Лист
Нач. ТБ	Курбанов				Н. Контроль	Г.А. Мельников				1
Нач. цеха	Курбанов									1

Рисунок 52 - Операционная карта изготовления замка лопатки

Операционная карта				N детали	Обозначение детали (шп.)	N опер.	Наименование операции	Марка материала	Марка ШП
Оборудование				Охлаждение	Разр.	Норма обл.	Т. маш.	Инструкция по ТБ	Тара
Micron UCP-800 DURO				Эмульсия					

NN пер.	Содержание перехода	Присто- соедине	Инструмент		Режим обработки		
			режущий	интермитный	i	S	n
1	Установить деталь в приспособление и закрепить	Спец. приспособ. ЦАЭ					
2	Фрезеровать по программе: предварительно с остаточным припуском 2 мм	F2330.T28.032.203 015			2000	935	
3	Фрезеровать по программе: - верхний торец пера - пера начисто	R216.24-10005000 22P			500	2000	
4	Фрезеровать по программе: приращивание части пера	H80111B-3			400	7500	

Nº	Шифр	A1-A1	A2-A2	A3-A3	A4-A4	A5-A5	A6-A6	A7-A7	A8-A8
01	152.243.091-7	3.6	7.6	17.6	27.6	37.6	47.6	52.6	62.6
02	152.243.091-8	3.6	7.6	17.6	27.6	37.6	47.6	52.6	62.6

Изм.	И. доп.	Фамилия	Подпись	Дата	Изм.	И. доп.	Фамилия	Подпись	Дата	Лист
Нач. ТБ	Курбанов				Н. Контроль	Г.А. Мельников				1
Нач. цеха	Курбанов									1

Рисунок 53 - Операционная карта изготовления пера лопатки

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ю.С. Елисеев, А.Г. Бойцов, В.В. Крымов, Л.А. Хворостухин Технология производства авиационных газотурбинных двигателей. Учебник для вузов М.: Машиностроение, 2003.-
2. А.М. Сулима, А.А. Носков, Г.З. Серебренников «Основы технологии производства газотурбинных двигателей» Учебник для вузов М. «Машиностроение», 1998.
3. И.А. Иващенко «Проектирование технологических процессов производства двигателей летательных аппаратов. Учебное пособие для вузов М. Машиностроение, 1981.-224с.
4. Крымов В.В., Елисеев Ю.С., Зудин К.И. Производство газотурбинных двигателей / Под ред. В.В. Крымова. М.: Машиностроение, 2002.-376 с.
5. Российская энциклопедия CALS. Авиационно-космическое машиностроение /Гл. ред. А.Г. Братухин. М.: ОАО «НИЦ АСК», 2008.-608 с.
6. Абрамов Ю.А. Справочник технолога-машиностроителя (в 2-х томах). Том 2 // под ред. А.Г. Косиловой. – М: Машиностроение, 1985. - 496 с.