

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Южно-Уральский государственный университет»
(национальный исследовательский университет)
Факультет «Механико – технологический»
Кафедра «Технология автоматизированного машиностроения»

ПРОЕКТ ПРОВЕРЕН

Рецензент, должность

Антонов А.А., Гл. технолог
«31» мая 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой, д.т.н.

_____/В.И. Гузеев/
«07» июня 2017 г.

Расчет геометрических параметров зоны резания при обработке деталей
пространственно – сложной формы концевыми торовыми фрезами

ПОЯНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–150405.2017.157.00.ПЗ ВКР

Научный руководитель:

к.т.н доцент.

_____В.В. Батуев
«23» мая 2017 г.

студент группы П – 261

_____А.Р. Шарафутдинов
«23» мая 2017 г.

Челябинск 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1. ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННО – СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНЦВЫМИ ТОРОВЫМИ ФРЕЗАМИ	12
1.1 Особенности процесса обработки пространственно – сложных поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ	12
1.2 Анализ остаточного припуска после операции чернового фрезерования пространственно – сложных поверхностей концевыми фрезами (цилиндрическими, торовыми).....	16
1.3 Выводы по обзору.....	20
1.4 Теоретические предпосылки. Цель и задачи исследования	20
2. МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	26
2.1 Методика теоретических исследований	27
2.1.1 Проектирование пространственно – сложных поверхностей.	27
2.1.2 Моделирование элементарных составляющих сил пластического деформирования при резании металлов	32
2.2 Исследование изменяющихся геометрических параметров зоны резания.....	35
2.2.1 Влияние толщины срезаемого слоя на величину силы резания	35
2.2.2 Влияние положения и длины активной части режущей кромки на величину силы резания.	38
2.3 Методика расчета составляющих силы резания при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск	41

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТУПЕНЧАТОГО ПРИПУСКА НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ	43
3.1 Определение вида зависимости для расчета составляющих силы резания с учетом особенностей объемного фрезерования	45
3.2 Определение переменных параметров, входящих в аналитическую зависимость	47
3.3 Расчетное определение геометрии срезаемого слоя при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей, концевыми торowymi фрезами	48
3.4 Расчет положения и длины активной части режущей кромки при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами.	51
3.5 Расчет составляющих силы резания	55
ВЫВОДЫ.....	57
4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННО – СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНЦВЫМИ ФРЕЗАМИ.....	59
4.1 Влияние геометрических параметров концевых фрез на остаточный припуск при фрезеровании пространственно сложных поверхностей.....	59
4.2 Влияние геометрических параметров концевых торowych фрез на силы резания	62
Общие выводы.....	63

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время уровень технического и технологического прогресса обуславливается применением в машинах и механизмах целый ряд деталей, имеющих пространственно – сложные поверхности, применение которых позволяет расширить функциональные, технологические и эксплуатационные возможности машин. К таким деталям относятся различные лопасти паровых и газовых турбин, крыльчатки, гребные и воздушные винты, импеллеры и т.п.

Производство деталей с пространственно – сложными поверхностями отличается технологической сложностью и высокой трудоемкостью. Механическая обработка таких деталей осуществляется на мехатронном оборудовании, т.е. оборудовании с компьютерным управлением, предназначенным для выполнения конкретной задачи, с четырьмя и более одновременно управляемыми координатами.

Многокоординатная обработка деталей с пространственно – сложными поверхностями характеризуется непрерывным изменением геометрических параметров зоны резания, а именно параметров удаляемого припуска и сечений срезаемых слоев, что оказывает существенное влияние на нестабильность силы резания, и как следствие, на точность обрабатываемой поверхности.

Эффективность изготовления деталей с пространственно – сложными поверхностями зависит от технических возможностей станочного оборудования, средств технической подготовки производства и способов управления движения инструмента и обрабатываемой заготовки, для получения заданной поверхности на станке. Повышение эффективности изготовления деталей с пространственно – сложными поверхностями возможно путем расширения функциональных возможностей инженера – проектировщика при помощи компьютерных средств САМ – проектирования.

Прогрессивным способом обеспечения точности обработки на многокоординатных станках с ЧПУ является стабилизация силы резания за

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

счет управления геометрическими параметрами зоны резания. Этот подход связан с наименьшими затратами, так как реализуется полностью программными средствами, не требуя конструктивных изменений или модернизации оборудования, а также является наиболее гибким, поскольку прост в реализации при помощи САМ систем.

Таким образом определение влияние геометрических параметров зоны резания, таких как ширина удаляемого припуска и сечений срезаемых слоев является актуальной задачей.

Целью работы является определение влияния геометрических параметров припуска после операции чернового фрезерования пространственно – сложных поверхностей концевыми торowymi фрезами на точность обработанной поверхности.

Для достижения данной цели в работе поставлен ряд задач, которые последовательно рассмотрены в 4 главах диссертации.

В первой главе рассмотрено состояние вопроса и проведен анализ работ, посвященных изучению особенностям процесса обработки пространственно – сложных поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ концевыми торowymi фрезами, произведен анализ остаточного припуска после операции чернового фрезерования пространственно – сложных поверхностей концевыми цилиндрическими и торowymi фрезами. На основании выводов определена цель и задачи исследования.

Во второй главе дано описание методики теоретических и экспериментальных исследований. Выбраны методы и математический аппарат проведения теоретических исследований изменяющихся геометрических параметров зоны резания, а также методика обработки полученных результатов.

Третья глава посвящена влиянию нестабильности геометрических параметров ступенчатого припуска на составляющие силы резания при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей концевыми торowymi фрезами. Дано описание выполнения этапов разработанной

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

методики с приведением расчетных схем и формул для расчета составляющих силы резания.

В четвертой главе проведено исследование полученных результатов, выполнен сравнительный анализ полученных значений при фрезеровании пространственно сложных поверхностей концевыми торowymi и цилиндрическими фрезами. Определены зависимости геометрических параметров концевых торowych и цилиндрических фрез на остаточный припуск при фрезеровании пространственно сложных поверхностей, а также их влияние на силы резания.

Научная новизна данной диссертации заключается в следующем:

1. Определена функциональная зависимость влияния геометрических параметров припуска после операции чернового фрезерования пространственно – сложных поверхностей концевыми торowymi фрезами на точность чистовой обработки пространственно – сложных поверхностей

2. Установлено, что при черновом фрезеровании концевыми торowymi фрезами влияние ступенчатого припуск вызывает изменение трех составляющих силы резания почти в 2 раза.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

1. ОБРАБОТКА ПРОСТРАНСТВЕННО – СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНЦВЫМИ ТОРОВЫМИ ФРЕЗАМИ

1.1 Особенности процесса обработки пространственно – сложных поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ

В современном машиностроении с каждым днем увеличивается потребность в деталях, имеющих пространственно – сложную форму. Огромное количество и большое разнообразие деталей, имеющих пространственно – сложную форму, требует увеличения формообразующей оснастки. Помимо этого, с увеличением разнообразия форм деталей, имеющих пространственно – сложную форму растут и требования, предъявляемые к точности их изготовления и к криволинейному профилю.

Основным средством автоматизации механической обработки деталей пространственно – сложной формы являются фрезерные станки с ЧПУ. Повышение эффективности использования такого оборудования может быть достигнуто за счет повышения точности объемного фрезерования, дающего возможность, с одной стороны, уменьшить количество переходов при машинной обработке поверхностей, а с другой – уменьшить слой металла, снимаемый при последующей слесарной обработке, в результате чего может быть снижена суммарная трудоемкость изготовления детали.

Основным способом обработки деталей, имеющих пространственно – сложную форму, является объемное фрезерование на станках с ЧПУ концевыми цилиндрическими и радиусными фрезами [1, 2, 3]. Повышение эффективности обработки деталей, имеющих пространственно сложную форму на фрезерных станках с ЧПУ может быть достигнуто за счет повышения точности объемного фрезерования, путем уменьшения количества переходов при машинной обработке поверхностей, а, следовательно, уменьшение слоя металла, снимаемого при последующей слесарной обработке, в результате чего может быть снижена суммарная трудоемкость изготовления детали.

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						12
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Еще одним фактором, определяющим эффективность использования станков с ЧПУ является трудоемкость подготовки и отладки управляющих программ. Управляющие программы содержат сведения о траектории движения режущего инструмента, режимах резания и т.п., которая необходима для автоматического выполнения операции без вмешательства инженера проектировщика. Однако существует разрыв между постоянно растущими возможностями станков с ЧПУ и трудностями в разработке УП, обеспечивающей требуемое качество. Это происходит из – за недостатка изучения процесса объемного фрезерования, особенно динамических процессов в зоне резания, и отсутствия его формализованного описания в широком диапазоне колебания параметров процесса резания. От того, насколько полно спроектированная программа учитывает конкретные условия обработки, зависит экспериментальная трудоемкость ее отладки. При этом технологические возможности станков с ЧПУ, позволяющие назначать рациональные режимы резания на любом участке обрабатываемой поверхности, часто недоиспользуются [4].

Обработка деталей, имеющих пространственно – сложные поверхности осуществляется в основном концевыми цилиндрическими, сферическими и торовыми фрезами. Обработка таких деталей осуществляется следующими схемами обработки:

1. По эквидистанте. Удаление металла в процессе обработки происходит от центра конструктивного элемента по эквидистанте к его контуру.
2. Обратная эквидистанта. Удаление металла в процессе обработки происходит от внешнего контура конструктивного элемента по эквидистанте к его центру.
3. Обработка по зигзагообразной траектории. Обработка ведется параллельными проходами с заданным шагом и углом наклона к оси X.
4. Обработка по спирали.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5. Петля UV. Обработка вдоль параметрических (UV) линий поверхности с сохранением только попутного либо встречного фрезерования. Направление задается углом к оси X

6. Зигзаг UV. Обработка ведется вдоль параметрических (UV) линий поверхности параллельными проходами с заданным шагом и углом наклона к оси X.

Для наглядности на рисунке 1.1 представлены вышеперечисленные схемы обработки.

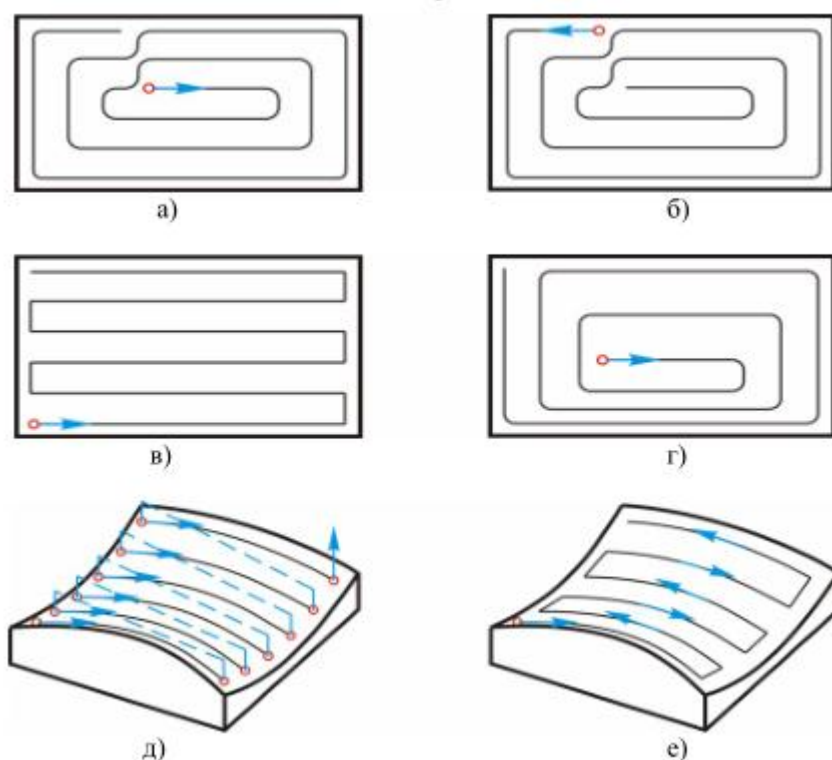


Рисунок 1.1 – Принципиальные схемы обработки

(а – эквидистанта; б – обратная эквидистанта; в – зигзаг; г – спираль; д– петля UV; е – зигзаг UV).

Наиболее сложной задачей при проектировании операционного процесса является определение рациональной траектории рабочих перемещений инструмента при фрезеровании каждой конкретной зоны поверхности. Траекторию инструмент в зависимости от выбранной схемы обработки задается субъективно инженером – проектировщиком, который в свою очередь может оперировать и углами наклона режущего инструмента, к

обрабатываемой поверхности, следовательно, относительно ступенчатого припуска.

Необходимо отметить, что в современном машиностроительном производстве все этапы обработки деталей имеющих пространственно – сложную форму проводятся на одном рабочем месте, то есть за одну установку, меняется лишь режущий инструмент.

При обработке деталей, имеющих пространственно – сложную форму, с использованием фрезерных станков с ЧПУ технологический процесс, как правило, состоит из трех этапов:

1. Черновое фрезерование.
2. Чистовое фрезерование.
3. Доводочные операции.

Этап черного фрезерования, в большинстве случаев, заключается в снятии напуска для достижения максимального приближения формы обрабатываемой заготовки к форме готовой детали. При этом производится послойное (горизонтами) снятие напуска концевыми фрезами. Как правило, напуск снимается слоями с постоянной шириной фрезерования (рисунок 1.2). В результате под чистовое фрезерование остается ступенчатый припуск, высота ступенек которого задается субъективно технологом и на производстве колеблется от 0,5 до 3мм. Этап чистового фрезерования заключается в снятии ступенчатого припуска, оставленного после операции черного фрезерования и приближения к окончательному контуру для получения точности размеров и формы готовой детали. При большом количестве «ступенек» на чисто обработанных поверхностях образуется такое отклонение формы как волнистость. Для избежания такого вида погрешности необходимо учитывать его при выборе параметров обработки на стадии черного фрезерования. Доводочные операции служат для окончательной обработки детали и достижения заданных чертежом требований по точности и шероховатости. Припуск под эти операции составляет 0,1–0,5 мм.

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						15
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

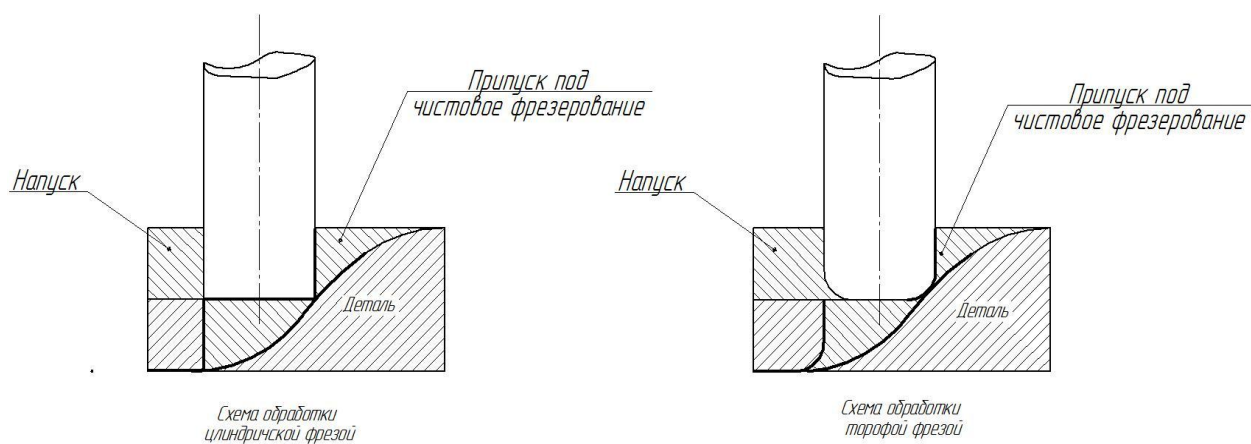


Рис. 1.2 – Послойное снятие напуска при черновом фрезеровании цилиндрической и торовой фрезой

1.2 Анализ остаточного припуска после операции чернового фрезерования пространственно – сложных поверхностей концевыми фрезами (цилиндрическими, торовыми)

Суть анализа заключается в выявлении законов описывающих обрабатываемую пространственно – сложную поверхность и поверхность описывающую режущую кромку инструмента. Для решения поставленной задачи необходимо обратиться к методам аналитической геометрии.

В настоящий время отсутствуют более детальные исследования влияния остаточного припуска после операции чернового фрезерования при обработке концевыми торовыми фрезами на силы резания.

В таких работах как [5,6,7,8] авторами были сделаны важные выводы о том, что в процессе обработки деталей, имеющих пространственно – сложные поверхности даже при условии, что припуск будет равномерным, концевыми торовыми фрезами все равно происходит изменение таких геометрических параметров зоны резания как толщина срезаемого слоя и положение и длина активной части режущей кромки.

Толщину срезаемого слоя можно определить, как расстояние между двумя последовательными положениями фрезы, величина толщины срезаемого слоя является переменной и для торовых фрез зависит от угла

поворота зуба, угла наклона обрабатываемой поверхности и величины подачи на зуб.

В.А. Батуевым [1] была получена зависимость определения толщины срезаемого слоя в любой точке криволинейной поверхности режущей части фрезы при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей при различных углах наклона обрабатываемой поверхности и в каждый момент поворота зуба фрезы.

$$a_i = S_z \sqrt{1 - (\pm \sin \varphi_i \cdot \sin \Psi_i \cdot \sin[\omega] + \cos \varphi_i \cdot \cos[\omega])^2 - \sin^2 \varphi_i \cdot \cos^2 \Psi_i}, \quad (1.1)$$

где S_z – подача на зуб; Ψ_i – значение угла контакта зуба фрезы для точки i ; φ_i – угол профиля в рассматриваемой точке i режущей кромки; ω – угол наклона обрабатываемой поверхности к горизонтальной плоскости.

Однако, данная формула подходит для рассмотрения процесса фрезерования пространственно – сложных поверхностей, имеющих равномерный припуск и не учитывает особенности геометрических параметров зоны резания при фрезеровании поверхности пространственно – сложной формы со ступенчатым припуском. К таким относится тот факт, что стружка, образованная при фрезеровании пространственно сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск будет усечена вертикальными и горизонтальными плоскостями, формирующими ступенчатый припуск.

При фрезеровании пространственно сложных – поверхностей в зависимости от параметров обработки таких как направление подачи, величины срезаемого припуска и других, происходит непрерывное изменение величины контакта криволинейной режущей кромки инструмента и обрабатываемой поверхностью. В свое время В.А. Батуев [1] подробно рассмотрел вопросы связанные с изменением положения и длины активной части режущей кромки. Выведенные им формулы позволяют описать форму и расположение «пятна контакта» фрезы с обрабатываемой поверхностью, а это означает что появляется возможность определить положение и длину активной части режущей кромки. Но в работе рассмотрен случай фрезерования поверхности пространственно – сложной формы с равномерным

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						17
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

припуском. В действительности же это составляет менее чем 30% от всей номенклатуры обработки существующих деталей. Следовательно, формулы, полученные в работе В.А. Батуева нельзя применять для описания “пятна контакта” фрезы с поверхностью, имеющей ступенчатый припуск.

В свою очередь А.В. Выбойщик рассматривал вопрос фрезерования пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском. Однако расчеты геометрических параметров зоны резания он проводил для частного случая фрезерования – поперек ступенчатого припуска при угле поворота $\Psi=90^\circ$. И в его работе не были рассмотрены особенности расчета толщины срезаемого слоя в условиях ступенчатого припуска.

Для проведения анализа остаточного припуска необходимо определить величину площади остаточного припуска после операции чернового фрезерования концевыми торowymi фрезами. Для примера рассмотрим обработку концевыми цилиндрическими и торowymi фрезами и сравним результаты.

В общем случае существенным отличием этих фрез является то, что при обработке концевыми торowymi фрезами в отличие от цилиндрической в работе могут участвовать, как режущие кромки, находящиеся на сферической части, так и режущие кромки, находящиеся на цилиндрическом или коническом участках фрезы.

Для расчета остаточное припуска после операции чернового фрезерования с использованием торowych фрез воспользуемся методом аппроксимации, вычисления будем производить по упрощенной схеме по аналогии расчета площади криволинейной трапеции. Площадь гребешка, обозначим его $S_{гр}$, которая в свою очередь будет ограничена линиями

$y = f(x)$ (уравнение описывающее контур режущей кромки), $y = 0$; $x = a$ и $x = b$ (линии, ограничивающие величину ступеньки равную величине толщины срезаемого слоя), причем функция $f(x)$ непрерывна на отрезке $[a; b]$ и не меняет свой знак. Определенный интеграл $\int_a^b f(x)dx$ для функции $f(x)$

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

являющийся непрерывной и неотрицательной на отрезке $[a; b]$, и есть площадь соответствующей криволинейной фигуры. То есть, чтобы найти площадь фигуры $S_{гр}$, ограниченной линиями $y = f(x)$, $y = 0$, $x = a$ и $x = b$, необходимо вычислить определенный интеграл $\int_a^b f(x)dx$. При расчете площади остаточных гребешков, оставленных после операции чернового фрезерования для адекватного анализа полученных результатов высоту ступенек, возьмем одинаковую при обработке концевыми цилиндрическими и торовыми фрезами. В свою очередь поверхность торовых фрез разбивается на 3 элементарных участка и описывается следующими формулами, таких как 2 уравнения прямых $y = kx + b$ и уравнение окружности $(x - a)^2 + (y - b)^2 = R^2$, при этом поверхность цилиндрических фрез можно описать с помощью уравнения двух взаимно перпендикулярных прямых. На рисунке 1.3 представлена методика расчета остаточного припуска при фрезеровании концевыми цилиндрическими и торовыми фрезами.

Методика расчета остаточного припуска

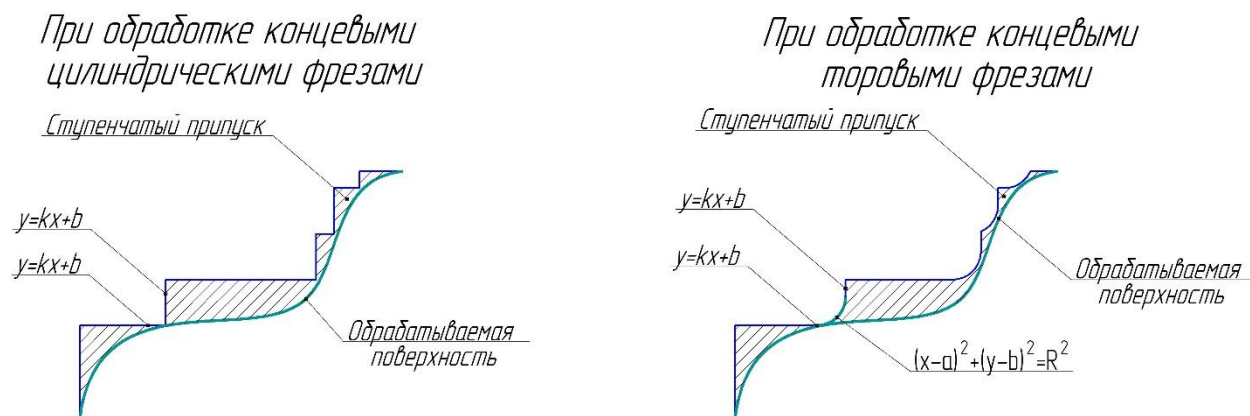


Рисунок 1.3 – методика расчета остаточного припуска после операции чернового фрезерования.

Следующим этапом будет подстановка выведенных формул описывающих режущую кромку торовой фрезы, подставляя полученные выражение в формулу определенного интеграла получим выражение (1.2):

$$\int_{k_n x_n + b_n}^n k_i x_i dx + b_i - \int_{k_{n-1} x_{n-1} + b_{n-1}}^n (x_{i-1}) dx + (y - b_{i-1}) - R, \quad (1.2)$$

Для цилиндрической фрезы проводим аналогичный вывод согласно выражению (1.3):

$$\int_{k_n x_n + b_n}^n k_i x_i dx + b_i. \quad (1.3)$$

Исходя из полученных выражений подставив определенные значения можно сделать вывод, что величина площади остаточного припуска после операции чернового фрезерования пространственно – сложных поверхностей концевыми цилиндрическими фрезами на 18,02 % больше, площади оставленного при обработке торowymi фрезами.

1.3 Выводы по обзору

Анализ существующих работ показал, что:

- при изготовлении деталей имеющих пространственно – сложную форму величина остаточного припуска после операции чернового фрезерования во многом зависит от профиля обрабатываемого инструмента;
- отсутствуют какие – либо описания геометрических параметров зоны резания (толщины срезаемого слоя, положения и длины активной части режущей кромки) при изменении величины ступенчатого припуска при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей торowymi фрезами;
- слабо изучено влияние величины остаточного припуска после операции чернового фрезерования концевыми торowymi фрезами на составляющие силы резания при фрезеровании деталей пространственно – сложной формы со ступенчатым припуском.

1.4 Теоретические предпосылки. Цель и задачи исследования

Анализ изучения работ по обработке деталей пространственно – сложной формы показал, что вопрос детально не изучен, существуют методики расчета составляющих сил резания, величины срезаемого слоя, положения длины активной части режущей кромки и т.д. лишь для частных случаев. Отсутствует изучение вопроса влияние остаточных гребешков после

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

операции чернового фрезерования деталей, имеющих пространственно – сложную форму при обработке торowymi фрезами на составляющие силы резания.

При объемном фрезеровании происходит непрерывное изменение параметров обработки такие как: направление подачи режущего инструмента, взаимное расположение режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности, толщина срезаемого слоя, положение и длина активной части режущей кромки и т.п. В совокупности изменение данных параметров вызывает переменные упругие деформации технологической системы из – за нестабильности сил резания. В свою очередь величина остаточного припуска после операции чернового фрезерования деталей, имеющих пространственно сложную форму влияет на последующие операции. Как оговаривалось ранее наиболее распространенным видом отклонения формы, на которую влияет остаточный припуск является волнистость, следовательно, чтобы обеспечить требуемую точность выполнения размеров и отклонения формы уменьшается производительность за счет увеличения времени обработки на чистовых и доводочных операциях.

С нестабильностью составляющих сил резания связано и постоянное изменение погрешности на разных участках обрабатываемой поверхности. При отсутствии влияния сил резания на точность обработки, размеры получаемой детали определялись бы лишь размером статической настройки. Однако, в процессе обработке, из – за постоянно изменяющихся параметров зоны резания, составляющих сил резания и т.п. возникают дополнительные относительные перемещения режущего инструмента и обрабатываемой детали из – за упругих деформаций возникающих под действием внешних сил.

Величину A_{Δ} обрабатываемой детали для конкретного участка можно определить из уравнения (1.4):

$$A_{\Delta} = A_y + A_c + A_d, \quad (1.4)$$

где A_y – размер установки; A_c – размер статической настройки размерной или кинематической цепи; A_d – размер динамической настройки той же размерной

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						21
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

цепи. Значения величины A_y – размер установки и A_c – размер статической настройки размерной можно принять равной $constante$ из незначительных изменений в процессе обработки всей поверхности. Помимо этого, для фрезерных станков с ЧПУ поле рассеивание погрешности динамической настройки не превышает $\mp 0,02$ мм, это значение не является доминирующим, потому что для фрезерных станков с ЧПУ поле рассеяния, вызываемое погрешностью динамической настройки, начинает преобладать с достижением величины равным 0,5 мм.

Изменение размера динамической настройки и зависящее от него значение A_d заданное чертежом вызывается колебаниями величины составляющих сил резания, которое в свою очередь влияет на возникновение дополнительных упругих перемещений в технологической системе.

В результате колебания составляющих сил резания величина значения размера динамической настройки получает некоторое приращение, которое было подробно описано в трудах Б.С. Балакшина [10]:

$$A_d \mp \Delta A_d = \frac{(P \mp \Delta P)}{J_{t.c}}$$

В результате этого происходит искажение заданной траектории режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности в управляющей программе станка, в следствии которого возникает погрешность формы обрабатываемой поверхности Δ_f . Результатом такого воздействия поле рассеивания получаемых размеров на разных участках обрабатываемой поверхности отклоняется на разные величины. Таким образом, точность получаемых размеров на разных участках пространственно – сложных деталей оказывается различной и зависит от кривизны обрабатываемой поверхности

Проблемы связанные с повышением точности получаемых размеров при обработке деталей пространственно – сложной формы можно решить опираясь на решения связанные с управлением или компенсацией упругих перемещений, возникающие от нестабильности сил резания.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В настоящее время для того что бы сохранить постоянство величины A_{Δ} целесообразно использовать один из двух нижеперечисленных методов, которые принципиально отличаются друг от друга. Суть первого метода заключается в том, что при отклонении размера динамической настройки от номинального значения A_{Δ} , эта величина компенсируют за счет внесения поправок ($\Delta A_C = \Delta A_D$) в размер статической настройки, но с обратным знаком, то есть подставляя значения получим:

$$A_{\Delta} = A_y + (A_C \pm \Delta A_C) + (A_D \pm \Delta A_D)$$

В данном случае размер статической настройки можно корректировать перемещением элементов технологической системы на ΔA_C . Для станков, оснащенных системой ЧПУ такая коррекция заключается в «предискажении» траектории движения инструмента для каждого отдельного участка пространственно – сложной поверхности. Однако данный способ не нашел широкого применения при объемном фрезеровании из – за значительные усложнения процесса подготовки управляющей программы, связанного с необходимостью расчета «предискажений» для большого числа различных участков детали пространственно – сложной формы.

Второй метод заключается в том, что для сохранения постоянства величины упругих деформаций возникающих под действием внешних сил, необходимо стабилизация самого размера динамической настройки той же размерной цепи, т. е. отклонения ΔA_D компенсируют коррекцией размера динамической настройки поправкой с обратным знаком.

$$A_{\Delta} = A_y + A_C + (A_D \pm \Delta A_D \pm \Delta A_D)$$

При использовании станков, оснащенных числовым программным управлением, для уменьшения погрешностей обработки возможно комплексное применение перечисленных методов. Тогда, стабилизируется величина погрешности динамической настройки ΔA_D , которая, в свою очередь, компенсируется введением в управляющую программу поправки (коррекции) на размер статической настройки.

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тем не менее, для уменьшения погрешностей обработки пространственно – сложных поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ наиболее целесообразно применение второго метода. Для токарных станков с ЧПУ наиболее целесообразным является комплексное использование обоих способов для уменьшения погрешности обработки и повышения производительности. В этом случае стабилизированная величина погрешности динамической настройки ΔA_d компенсируется поправкой размера статической настройки. Такая поправка может быть легко введена перед первым кадром управляющей программы и остается постоянной при обработке всей криволинейной поверхности.

Для того что бы реализовать эффективное управление режимами резания с целью повышения точности обработки необходима математическая модель, адекватно отражающая изменение совокупности сил резания на погрешность динамической настройки. Такая модель может быть представлена в виде функциональной зависимости основываться на одном из принципиально различных методов: эмпирическом или аналитическом.

Главным недостатком модели, основанной на эмпирических зависимостях, является то, что при их определении их определении не учитываются влияния различных исследуемых факторов процесса резания связанных между собой и зачастую все они носят частный характер. В результате использование данного метода не позволит создать адекватную модель процесса резания для управления режимами обработки.

Кроме того, оценить дифференцированно и совместно влияние многих переменных параметров процесса объемного фрезерования на выходные параметры деталей (точность получаемых размеров и отклонение формы) экспериментальным путем практически невозможно. Все это приводит к ограничению области применения, малой достоверности и ненадежности модели управления.

В отличие от эмпирической, математическая модель лишена таких недостатков, построенная на основе аналитических зависимостей, адекватно

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						24
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

отражающих процесс взаимодействия инструмента и обрабатываемой детали, и связывающая режимные параметры обработки с выходными показателями детали в широком диапазоне варьирования переменных. В основу такой модели должно быть положено выражение, полученное путем аналитического расчета сил резания и функционально связывающее погрешности размера динамической надстройки, жесткость технологической системы, силы резания и изменяющуюся геометрию зоны резания на любом участке обрабатываемой поверхности сложной формы.

Опираясь на вышеизложенное, целью работы будет являться: расчет геометрических параметров зоны резания при обработке деталей пространственно – сложной формы концевыми торowymi фрезами.

Для того что бы достигнуть поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить виды форм остаточных гребешков после черновой обработки (ступенчатого припуска) при обработке различными концевыми фрезами (цилиндрической и торовой);

2. Разработать формулы для расчета геометрических параметров зоны резания при фрезеровании пространственно – сложной поверхности со ступенчатым припуском, оставшимся после черновой обработки торовой фрезой;

3. Произвести расчет сил резания на стадии чистовой обработки поверхности со ступенчатым припуском;

4. Выявить закономерность влияния формы остаточного ступенчатого припуска на составляющие силы резания и провести их анализ.

Решение поставленных задач позволит добиться уменьшения погрешности при расчете составляющих сил резания и, следовательно, погрешности размера динамической надстройки.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. МЕТОДИКА ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В соответствии с задачами, поставленными в первой главе, в работе проведены исследования:

- изменения геометрических параметров зоны резания при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск, концевыми торowymi фрезами;
- уменьшение возникновения погрешности при расчете составляющих сил резания и, следовательно, размера динамической настройки при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском на станках с ЧПУ

В первой главе было показано, что фрезерование пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском концевыми торowymi фрезами связано с непрерывным изменением параметров обработки, таких как взаимного положения фрезы и обрабатываемой поверхности, геометрических параметров зоны резания и прочих. В третьей главе проведены исследования таких геометрических параметров зоны резания, как толщины срезаемого слоя, положения и длины активной части режущей кромки. Известно, что при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском геометрия зоны резания влияет на величину, направление и точку приложения силы резания, возникающую на криволинейной части режущей кромки.

В четвертой главе приведен сравнительный анализ полученных данных при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей концевыми фрезами (торowymi и цилиндрическими).

Методика теоретических и экспериментальных исследований заключается в следующем.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2.1 Методика теоретических исследований

2.1.1 Проектирование пространственно – сложных поверхностей.

Важной особенностью систем ЧПУ является программирование функций траектории движения инструментов, предназначенных для обработки деталей, поверхности которых имеют пространственно – сложные поверхности. В случае обработки деталей с осями перемещения инструмента более пяти, УП не может составляться непосредственно на стойке системы ЧПУ [11, 12].

Каждая система с числовым программным управлением по – своему уникально и имеет собственный синтаксис управляющей. Поэтому процесс подготовки программ для многокоординатной обработки является весьма затруднительным. Наиболее удобным и широко распространенным методом разработки УП, является автоматизированный метод с применением CAD/CAM систем. Применение данного метода позволяет задавать технологические параметры обработки, создавать траектории движения инструмента, генерировать УП в кодах конкретного станка.

Повышение качества программирования возможно только при применении САПР, эффективность которого зависит от математического, методического, алгоритмического и других видов программного обеспечения.

Известны разные способы конструирования поверхностей: кинематический, аналитический, проективный, нелинейные преобразования и др. [13, 14, 15]. Эти способы имеют свою область применения и позволяют получить математическую модель поверхности с разными формами ее представления. Обработка сложных поверхностей требует согласования движений формообразующих узлов МОС, которое реализуется системой ЧПУ. Эти движения зависят от технологии изготовления детали. Если деталь получается механической обработкой на станке с ЧПУ, то совокупность технологических движений будет сложной.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Для проектирования пространственно – сложных поверхностей применение нашли различные САПР. Например, описание сложных поверхностей можно проводить с помощью полиномов. Этот прием предопределяет использование станков с ЧПУ и необходимость в преобразовании математической модели поверхности фигуры в виде решения задач интерполяции или расчета эквидистанты.

Поверхность можно представить, как систему, состоящую из структурной части (S) и параметрической части (P): $\langle S, P \rangle$. Исходя из единства задач проектирования и воспроизведения поверхностей на технологическом оборудовании, можно считать основным методом проектирования поверхностей – кинематический (или каркасно – кинематический). В этом случае (S) определяется свойствами образующей и направляющей линий, а также взаимодействием этих свойств. А параметрическая часть (P) определяет, какие именно из шести элементарных движений приняты в качестве параметров при описании поверхности и соответственно образующей и направляющей линий, а также пределы изменения параметров. Последние параметры могут быть конечными и бесконечными. Конечные пределы изменения параметров предпочтительные по сравнению с бесконечными, так как обладают лучшими свойствами при проектировании поверхности и разработке управляющей программы для ее обработки на технологическом комплексе.

При автоматизированном варианте проектирования поверхностей существуют два различных направления: подгонка и собственно проектирование. Подгонка поверхности осуществляется тогда, когда проектирование ведется традиционными методами (с помощью шаблонов, плазов и т.п.), а затем на основе физической модели поверхности создается ее математическая модель.

Собственно, проектирование осуществляется с помощью САПР, при этом формирование математической модели поверхности происходит в процессе ее проектирования с помощью описания кривых по сегментам. В

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

частности, при описании сегментов используется кубическая параметризация для определения кривых и поверхностей.

Существуют и другие математические основы разработки моделей, например, с использованием алгоритмической связи между процессами проектирования и формообразования поверхностей. Для разработки связи используются «аффинные» преобразования некоторой области в поверхность произвольного вида, расположенную в трехмерном пространстве. Путем выделения из множества аффинных преобразований, только преобразование поворота и переноса можно обеспечить физическую общность процессов проектирования и формообразования поверхностей на основе представления структуры станка с ЧПУ в виде функции формообразования.

Математические основы разработки моделей, построенных на основе формообразующих кривых, позволяют проектировать кривые и поверхности, обладающие заданными свойствами и имеющие физический аналог в виде формообразующей системы некоторого технологического оборудования, из которого можно получить другие структуры и технологические компоновки МРС.

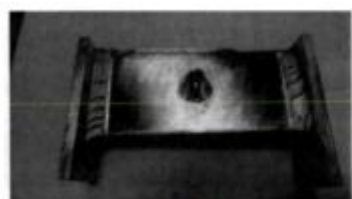
Существует связь между уравнениями кривых и поверхностей, обрабатываемых на МРС и структурой формообразующей системы такого станка. В работе [16] разработаны математические модели кривых и поверхностей, для обработки которых используются звенья технологического оборудования, совершающие простые движения, или технологическое оборудование с ЧПУ, совершающего сложные движения.

В принципе, используя методику проектирования поверхностей и кривых в формообразующем виде, можно проектировать достаточно сложные поверхности, при этом коэффициенты, характеризующие их свойства, одновременно являются параметрами настройки металлорежущих систем, что существенно упрощает процедуру УП для ЧПУ.

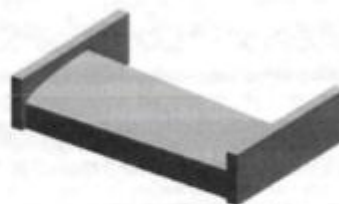
На рисунке 2.1 показан пример проектирования пространственно – сложной поверхности при обработке компрессорной лопатки. На схеме а

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

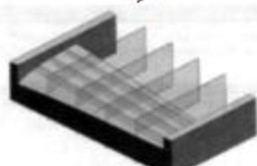
указана фотография поверхности компрессорной лопатки, б – 3 D модель построенная при помощи CAD системы, на схеме в указаны секущие плоскости по продольным и поперечным изопараметрическим линиям, г – построенная математическая модель, на схеме д – показаны система секущих плоскостей с изопараметрическими линиями, е – построены изопараметрические кривые лопатки.



а)



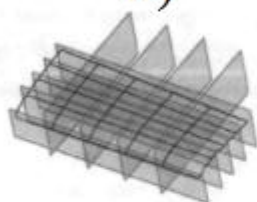
б)



в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.1 – пример проектирования пространственно – сложной поверхности при обработке компрессорной лопатки

Для проектирования пространственно – сложной поверхности необходимо разделить ход на следующие этапы:

1) сформировать 3D модель компрессорной лопатки при помощи CAD системы, (рисунок 2.1, б);

2) далее формируется математическая модель пространственно – сложной поверхности (рисунок 2.1, г) и создаются сечения посредством

задания секущих плоскостей на заданном расстоянии друг от друга (рисунок 2.1, в, д);

3) создаются кривые на секущих плоскостях по направлениям изопараметрических линий из массива теоретических точек (таблица 1), по которым можно натянуть сложную теоретическую поверхность двойной кривизны (рисунок 2.1, е).

Таблица 1 – Теоретические координаты точек изопараметрической кривой поверхности лопатки

У	Z
0	0
0.270714455	0.970513739
1.298735209	1.721759675
2.524452262	2.235770051
.....	
31.285823827	3.725668668
36.252727105	3.440244637
39.350357820	3.212144810
40.939681870	3.051489283

При ручном программировании координаты точек сечений на чертеже определяются с недостаточной точностью, а в ряде случаев с ошибками. По этой причине при создании математических моделей сложных поверхностей очень часто приходится корректировать табличные координаты. Отсюда возникает необходимость применения единой системы САПР:

- проведение оптимизации геометрии поверхности лопатки для последующей разработки УП;
- конструирование специальных станочных приспособлений;
- разработка комплекта УП с проверкой на отсутствие «зарезов» при механической обработке лопатки;

- разработка УП и технология обработки в среде CAD/ CAM/CAE;
- разработка УП для станка с ЧПУ с последующей генерацией их через постпроцессор для получения УП непосредственно в кодах системы управления станком.

2.1.2 Моделирование элементарных составляющих сил пластического деформирования при резании металлов

В процессе резания на различных участках режущих кромок режущего инструмента возникает огромное множество различных факторов, влияющих на процесс резания, которые изменяются на разных участках режущих кромок инструмента, следовательно, при аналитическом определении силы резания целесообразно определять элементарные ее составляющие, действующие на бесконечно малых участках режущих кромок.

Данный способ позволяет построить универсальную математическую модель силы резания, которая может применяться для различных видов обработки. Значение суммарной силы резания может быть получено после интегрирования выражений для определения элементарных составляющих силы резания.

Согласно схеме действия сил и напряжений, на элементарном участке передней и задней поверхностях инструмента (рисунок 2.2) сила сдвига $dP_{сд}$ определится:

$$dP_{сд} = \frac{a_i \cdot db \sigma_i}{\sin \beta_i \sqrt{3}} \quad (2.1)$$

где a_i – толщина срезаемого слоя на элементарном участке режущей кромки инструмента; db – элементарный участок режущей кромки; β_i – угол наклона условной плоскости сдвига. Угол характеризует меру пластической деформации при резании. Наиболее распространенный способ его определения, это метод с использованием коэффициента утолщения стружки K_a ; σ_i – интенсивность напряжений в зоне сдвига.

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

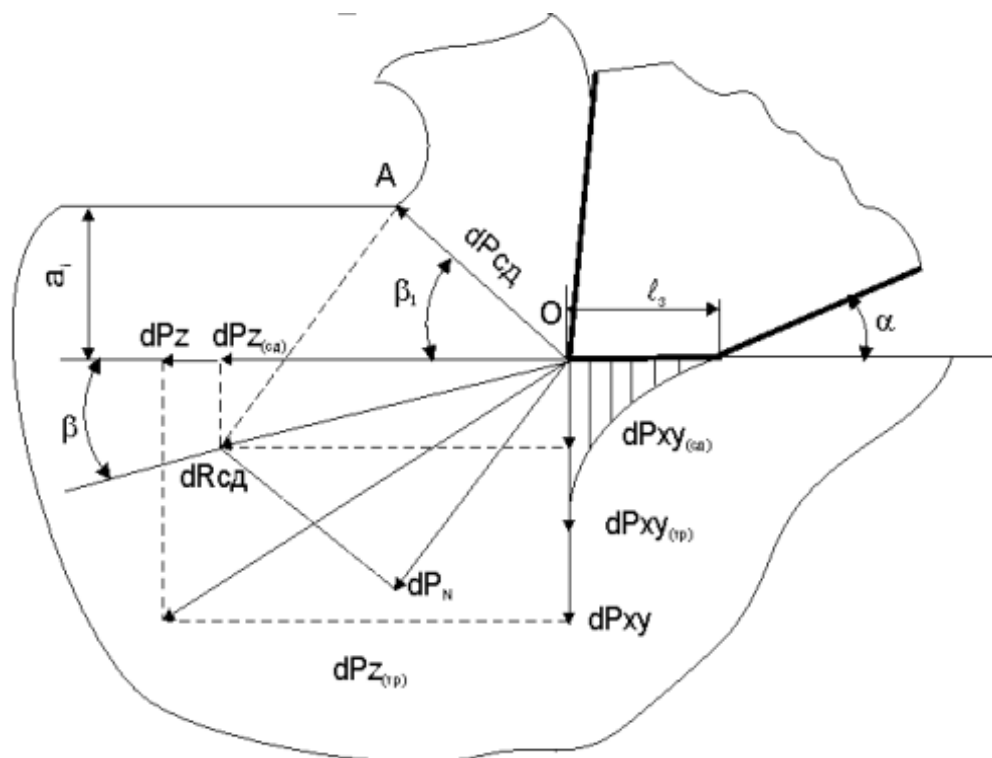


Рисунок 2.2 – Схема действия составляющих силы резания на передней и задней поверхностях инструмента

По составляющей dP_{cd} и сумме углов β и β_1 определяется равнодействующая сил пластического сдвига dR_{cd} .

$$dR_{cd} = dP_{cd} \cos(\beta + \beta_1) = \frac{a_i \cdot db \sigma_i}{\sqrt{3} \cos(\beta + \beta_1) \sin(\beta_1)} \cdot \quad (2.2)$$

По равнодействующей dR_{cd} и углу β определяются радиально – осевая $dP_{xy(сд)}$ и тангенциальная $dP_{z(сд)}$ составляющие силы резания связанные с пластическими деформациями материала в зоне сдвига

$$dP_{x(сд)} = dR \sin(\beta) = \frac{a_i \cdot db \sigma_i}{\sqrt{3} \cos(\beta + \beta_1) \sin(\beta_1)} \cdot \sin(\beta) ; \quad (2.3)$$

$$dP_{z(сд)} = dR \cos(\beta) = \frac{a_i \cdot db \sigma_i}{\sqrt{3} \cos(\beta + \beta_1) \sin(\beta_1)} \cdot \cos(\beta) . \quad (2.4)$$

где β – угол между линией сдвига и направлением равнодействующей dR_{cd} . Исходя из обзора проведенного в предыдущей главе о методиках расчета составляющих сил резания при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей концевыми фрезами было выявлено, что наиболее практичным соотношением между углами β_1 и β является выражение вида:

$$\beta = \frac{K_1 - \beta_1}{K_2}$$

где постоянные K_1 и K_2 выбирают с учетом конкретных условий обработки. В результате того, что в процессе резания металлов возникает большое количество неизвестных факторов, такие как анизотропия (различие свойств среды в различных направлениях внутри этой среды), упрочнение, изменение коэффициента трения и тепловых явлений, и которые влияют на угол сдвига, указывает на то, что в процессе резания угол сдвига постоянно изменяется. Наиболее практичным соотношением для широкого круга условий резания значения коэффициентов K_1 и K_2 является приближенная формула Оксли:

$$\beta = \frac{50 - \beta_1}{0.8}$$

Для определения сил, действующих на задней поверхности инструмента, необходимо знать закон распределения нормальных напряжений на площадке контакта, а также форму самой площадки.

На основе работы Талантов Н.В. [16] закон распределения нормальных напряжений на площадке контакта можно описать, используя выражение:

$$\sigma = 0,5\sigma_b \exp\left(-3\left(\frac{x}{i_3}\right)^2\right).$$

Интегрируя данной функции можно определить среднее значение напряжений, возникающих на площадках контакта:

$$\sigma_{\text{ср}} = 0,16\sigma_i$$

Тогда составляющие силы резания, действующие на задней поверхности инструмента, определяются из выражений:

$$dP_{xy(\text{тр})} = 0,16\sigma_i i_3 db, \tag{2.5}$$

$$dP_{z(\text{тр})} = 0,16\mu\sigma_i i_3 db,$$

где i_3 – длина площадки износа; μ – коэффициент трения.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Суммарные составляющие силы резания, действующие на элементарных участках передней и задней поверхностей инструмента, находятся из выражений:

$$dP_{xy} = \frac{a_i \cdot db \sigma_i}{\sqrt{3} \cos(\beta + \beta_1) \sin(\beta_1)} \cdot \sin(\beta) + 0,16 \sigma_i i_3 db ; \quad (2.6)$$

$$dP_z = \frac{a_i \cdot db \sigma_i}{\sqrt{3} \cos(\beta + \beta_1) \sin(\beta_1)} \cdot \cos(\beta) + 0,16 \mu \sigma_i i_3 db . \quad (2.7)$$

2.2 Исследование изменяющихся геометрических параметров зоны резания

Как говорилось ранее при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей имеющих равномерный ступенчатым припуском концевыми цилиндрическими и торовыми фрезами происходит непрерывное изменение таких геометрических параметров зоны резания как толщина срезаемого слоя, положение и длина активной части режущей кромки. В работе проведено теоретическое исследование, определяющее функциональную зависимость изменения толщины срезаемого слоя при изменении углов наклона обрабатываемой поверхности и величины ступенчатого припуска. Основываясь на формуле для расчета толщины среза, приведенной в работе [1] для случая фрезерования при равномерном припуске, разработаны аналитические зависимости, позволяющие определить толщину среза в каждой точке криволинейной режущей кромке при различных углах наклона обрабатываемой поверхности и высоте ступенчатого припуска.

Помимо толщины срезаемого слоя при объемном фрезеровании происходит изменение величины и формы “пятна контакта” фрезы и ступенчатого припуска, что в свою очередь влияет на положение и длину активной части режущей кромки в каждый момент поворота зуба.

2.2.1 Влияние толщины срезаемого слоя на величину силы резания

В настоящее время обработка деталей, имеющих пространственно – сложную форму приводит к значительной трудоемкости механической обработки. В этой связи возникает актуальная научно – техническая задача по

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

повышению производительности такой обработки. Одним из эффективных способов решения этой задачи является использование на многокоординатных станках с программным управлением фрез прогрессивных конструкций, оснащенных современными инструментальными материалами, на оптимальных режимах резания. В этой связи при проектировании операции фрезерования нужно учитывать ограничения по мощности и крутящему моменту шпинделя фрезерного станка.

Расчет силовых параметров фрезерования на протяжении длительного периода являлся предметом многочисленных исследований. В зарубежной литературе приводятся результаты этих работ, для которой в общем выражении сила резания записывается как:

$$P = K \cdot a_p \cdot h.$$

где a_p – осевая глубина, h – толщина срезаемого слоя. Константа K зависит от обрабатываемого материала, скорости резания и определяется экспериментально.

Позже этот подход расширили и предложили выражение для расчета сил учитывающую нелинейную зависимость силы от толщины срезаемого слоя:

$$P = K \cdot a_p \cdot h^x.$$

где x – второй экспериментальный параметр. Дальнейшие расчеты для определения тангенциальной и радиальной составляющей силы использовали комбинацию ряда моделей в виде:

$$P_t = K_t \cdot a_p \cdot h^x + K_{te} \cdot a_p; \quad (2.8)$$

$$P_r = K_r \cdot a_p \cdot h^x + K_{re} \cdot a_p; \quad (2.9)$$

Коэффициенты и показатель степени определены экспериментально. С быстро растущим уровнем развития машиностроительного производства, а, следовательно, способов и методов обработки деталей одним из вытекающих последствий является разнообразие способов расчета составляющих сил

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

резания для конкретных условий обработки. К примеру, в настоящее время зарубежными инструментальными фирмами распространена методика расчета сил резания через удельную силу, изложенная подробно в справочнике по резанию GARANT [18]. Согласно этой методике для любого вида лезвийной обработки тангенциальная составляющая силы резания может быть определена как:

$$P_c = bhK_cK_f = bh^{1-m} \cdot K_{c11}K_f. \quad (2.10)$$

где b, h – ширина, толщина срезаемого слоя, K_c – удельная сила резания, K_f – поправочный коэффициент, K_{c11} – удельная сила, приходящаяся на единицу площади среза, m – показатель степени. Значения удельной силы и показателя степени приведены для групп обрабатываемых материалов в справочной литературе, достаточно подробно в справочнике [4].

В отечественной справочной литературе для расчета тангенциальной силы фрезерования используют степенные уравнения вида:

$$P_z = C_{nn}f_{cp} + C_{зп}l_z; \quad P_{xy} = U_{nn}f_{cp} + U_{зп}l_{xy}; \quad (2.11)$$

где C_{nn}, U_{nn} – удельные силы на передней поверхности, $C_{зп}, U_{зп}$ – удельные силы на задней поверхности, f_{cp} – площадь срезаемого слоя, l_z, l_{xy} – проекции длины рабочей части режущей кромки на плоскости, перпендикулярные соответствующим составляющим силы резания. Здесь удельные силы являются расчетными параметрами и связаны прежде всего со степенью сдвиговой деформации процесса стружкообразования. Предложено относительный сдвиг определять либо с помощью экспериментов, либо пользуясь обобщенной зависимостью $\varepsilon = \varepsilon_\gamma(1 - K_\gamma \cdot \gamma)$, где относительный сдвиг при нулевом значении угла ε_γ и коэффициент K_γ даны для основных групп обрабатываемых материалов, γ – передний угол в град.

Основываясь на проведенном обзоре литературных источников, обоснована необходимость развития аналитических методов расчета силовых параметров, возникающих в процессе фрезерования пространственно –

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

сложных поверхностей концевыми торowymi и сферическими фрезами. Методика позволяет также оценить контактное давление, действующее со стороны лезвий инструмента на обрабатываемую поверхность заготовки.

Указанные расчетные параметры можно использовать для определения ограничений по станку, для расчета технологического приспособления и оценки степени деформации тонкостенных деталей в процессе обработки.

2.2.2 Влияние положения и длины активной части режущей кромки на величину силы резания.

При обработке деталей пространственно сложной формы, даже учитывая стратегии движения инструмента, которые рассматривались в предыдущей главе, при черновом фрезеровании деталей имеющих пространственно – сложную формы напуск удаляется слоями, это в свою очередь приводит к появлению на поверхности заготовки ступенчатого припуска под чистовое фрезерование. Зачастую при чистовом фрезеровании инструмент, перемещается под разными углами к обрабатываемой поверхности и к следам предшествующей обработки. Следовательно, происходит изменение не только форм «пятна контакта» фрезы с припуском, но и количество, положение и длины участков активной части режущей кромки. Такое непрерывное изменению геометрии зоны резания оказывает существенное влияние на величину и направление составляющих силы резания.

При фрезеровании деталей имеющих пространственно – сложную форму, имеющих поверхности со ступенчатым припуском В.А. Батуевым [5] были разработаны формулы (2.12) — (2.14), позволяющие определить составляющие силы резания при любом угле поворота зуба:

$$P_Z^{\Sigma} = \sum_{n=1}^z \sum_{j=1}^k 1.15\sigma_i \int_{\varphi_{\text{нп}}}^{\varphi_{\text{вп}}} \frac{a}{\sin\beta_1} \cos\beta R d\varphi + 0.252\mu\sigma_i \int_{\varphi_{\text{н}}}^{\varphi_{\text{в}}} l_3 R d\varphi; \quad (2.12)$$

$$P_x^{\Sigma} = \sum_{n=1}^z \sum_{j=1}^k 1.15\sigma_i \int_{\varphi_{\text{н}}}^{\varphi_{\text{в}}} \frac{a}{\sin\beta_1} \cos\beta \cos\varphi R d\varphi + 0.252\sigma_i \int_{\varphi_{\text{н}}}^{\varphi_{\text{в}}} l_3 \cos\varphi R d\varphi; \quad (2.13)$$

$$P_y^\Sigma = \sum_{n=1}^z \sum_{j=1}^k 1.15 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_B} \frac{a}{\sin \beta_1} \sin \beta \sin \varphi R d\varphi + 0.252 \sigma_i \int_{\varphi_n}^{\varphi_B} l_3 \sin \varphi R d\varphi, \quad (2.14)$$

где σ_i – интенсивность напряжений в движущемся объеме деформируемого металла; l_3 – величина фаски затупления; β_1 – угол сдвига; $\varphi_{вп} \varphi_{нп}$ – центральные углы между осью вращения фрезы и крайними точками пересечения лезвия с припуском; β – угол действия; a – толщина среза; R – радиус фрезы; z – количество зубьев фрезы; k – количество участков активной части режущей кромки; μ – коэффициент трения.

В качестве примера при помощи данных формул проведен расчет составляющих силы резания для фрезы радиусом $R = 6$ мм, подачи $S = 0,1$ мм/зуб, высоты ступеньки 2 мм, углов наклона обрабатываемой поверхности в направлении подачи $\alpha = 50^\circ$ и перпендикулярно направлению подачи $\eta = 60^\circ$ и построены графики (рисунке 2.3). На графиках видно, как изменяются составляющие силы резания в зависимости от формы «пятна контакта» при перемещении инструмента относительно ступенчатого припуска с шагом, равным подаче на зуб и неизменных углах наклона обрабатываемой поверхности.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

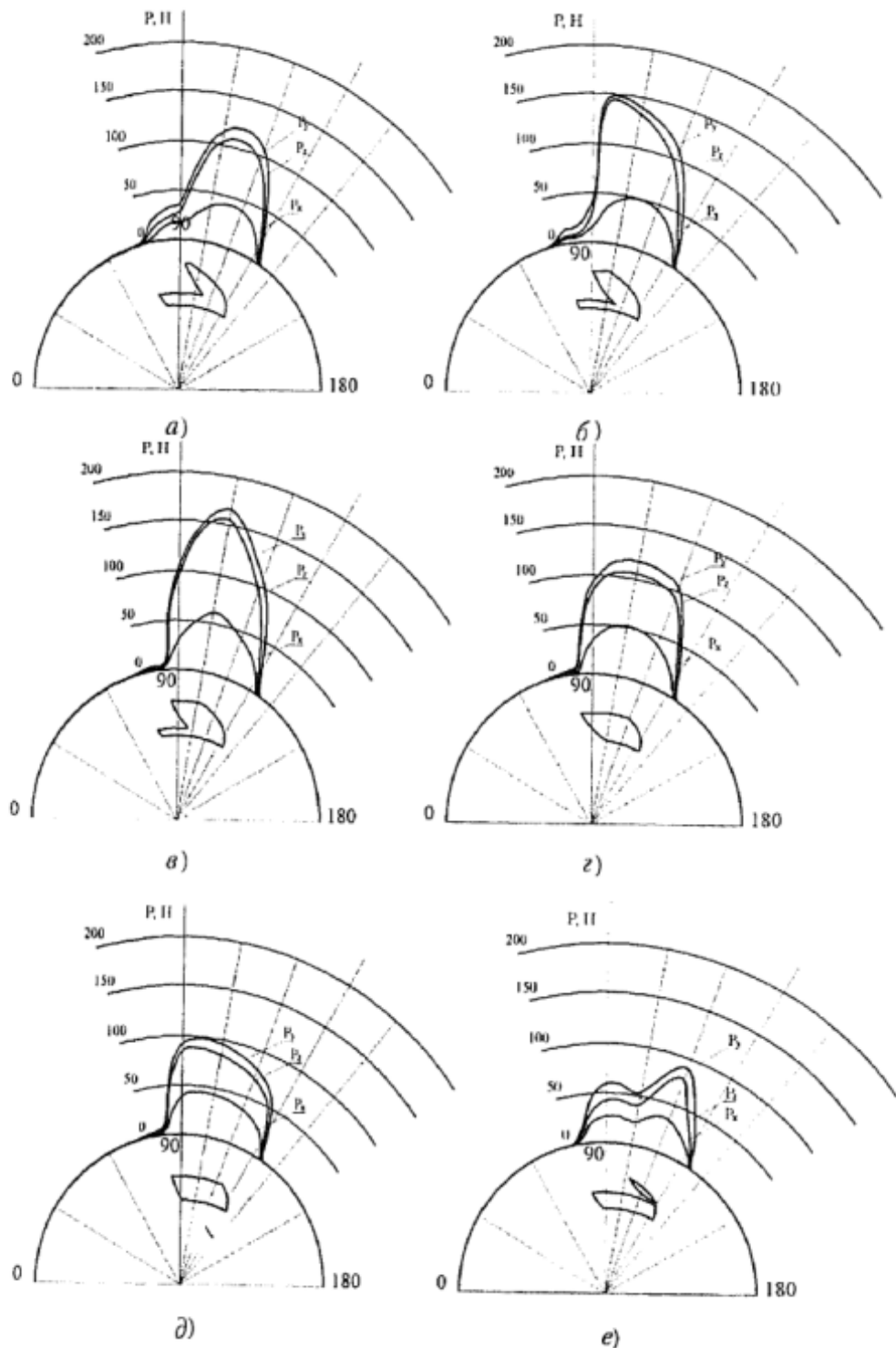


Рисунок 2.3 – Влияние формы «пятна контакта» на составляющие силы резания при пошаговом перемещении инструмента относительно ступенчатого припуска, мм: а – 0; б – 0,12; в – 0,24; г – 0,36; д – 0,48; е – 0,6.

Формулы (2.12) – (2.14) обладают гибкостью и могут быть использованы для расчетов составляющих сил резания для поверхностей с разными параметрами припуска. При этом профиль ступенек учитывается при

расчете центральных углов между осью вращения фрезы и крайними точками пересечения лезвия с припуском. Однако данная методика предполагает расчет составляющих сил резания при фрезеровании деталей пространственно – сложной формы концевыми сферическими фрезами, подразумевает обработку деталей пространственно – сложной формы при неизменных углах наклона обрабатываемой поверхности

2.3 Методика расчета составляющих силы резания при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск

В предыдущих главах было рассмотрено тот факт, что процесс обработки деталей, имеющих пространственно – сложную форму состоит из операций чернового фрезерования, чистового фрезерования и доводочной операции. На операции чернового фрезерования производится послойное снятие напуска концевыми торowymi или цилиндрическими фрезами, в результате обработки которыми на поверхности детали имеющих пространственно сложную форму формируется ступенчатый припуск под чистовую обработку. Высота образовавшихся ступенек, зачастую, постоянна по всей пространственно – сложной поверхности и задается в качестве исходных данных инженером – проектировщиком. Ширина образовавшихся ступенек переменна по всей длине обработки, так как зависит от углов наклона обрабатываемой поверхности, которые формируют форму детали, имеющую пространственно – сложную форму. Особенности процесса обработки в свою очередь влияют на геометрические параметры зоны резания при чистовом фрезеровании, такие как: толщина срезаемого слоя, его прерывистость, положение и длина активной части режущей кромки и, следовательно, исходя из этого, на силу резания в каждый момент поворота зуба фрезы. В связи с большим многообразием взаимодействия концевой радиусной фрезы и ступенчатого припуска необходима общая методика расчета составляющих силы резания, которая могла бы учитывать все возможные схемы чистового фрезерования пространственно – сложных поверхностей.

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						41
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

Общая методика расчета составляющих силы резания при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск, состоит из выполнения четырех этапов:

1. Определение вида зависимости для расчета составляющих силы резания с учетом особенностей объемного фрезерования.

2. Расчет геометрических параметров зоны резания при объемном фрезеровании (толщина срезаемого слоя, положение и длина активной части режущей кромки).

3. Определение переменных параметров расчетной схемы действия сил и напряжений на передней и задней поверхностях инструмента.

4. Расчет составляющих силы резания.

В следующей главе будут рассмотрены перечисленные этапы методики.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. ВЛИЯНИЕ НЕСТАБИЛЬНОСТИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТУПЕНЧАТОГО ПРИПУСКА НА СОСТАВЛЯЮЩИЕ СИЛЫ РЕЗАНИЯ

При фрезерной обработке деталей имеющих пространственно – сложные поверхности со ступенчатым припуском происходит непрерывное изменение геометрических параметров зоны резания, таких как толщина срезаемого слоя, положение и длина активной части режущей кромки, и т.п., что в свою очередь влияет на изменение силы резания. По данному вопросу исходя из анализа, проведенного в предыдущих главах можно сделать вывод, что постоянное изменение силы резания в процессе обработки влияет на точность получаемой поверхности при фрезерной обработке [2, 12]. Помимо этого, известно, что при обработке деталей имеющих пространственно – сложную форму концевыми фрезами наибольшую долю погрешности получаемой поверхности (до 30% и более) составляет погрешность от упругих отжатый технологической системы [15, 19, 20].

Для уменьшения погрешностей возникающих при фрезеровании деталей, имеющих пространственно – сложные формы на станках с ЧПУ целесообразно воспользоваться следующими приведенными методами:

1. Управление силой резания благодаря закономерным изменениям величины подачи.

2. Управление силой резания с помощью изменения геометрии зоны резания. К примеру, можно регулировать значение величины силы резания за счет изменения направления траектории движения инструмента относительно обрабатываемой детали, и, следовательно, ступенчатого припуска.

Для того что бы воспользоваться первым методом необходимо воспользоваться аналитическими зависимостями, которые в свою очередь устанавливают взаимосвязь между силой резания и изменением величины подачи. Подача, рассчитанная с помощью аналитических зависимостей для любого выбранного участка обрабатываемой поверхности, может быть введена вручную инженером – проектировщиком в кадры сомой управляющей

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

программы, которая подготавливается с помощью САМ систем, для каждой зоны обработки (рисунок 3.1).

Реализация второго метода – управление силой резания с помощью изменения геометрии зоны резания может осуществляться лишь расчетно – обоснованным изменением траектории движения инструмента относительно обрабатываемой поверхности и (или) величины ступенчатого припуска. На данный момент в существующих САМ системах назначение траектории движения инструмента, то есть вектора подачи, осуществляется инженером – проектировщиком вручную, и основывается только на личном опыте (рисунок 3.2).

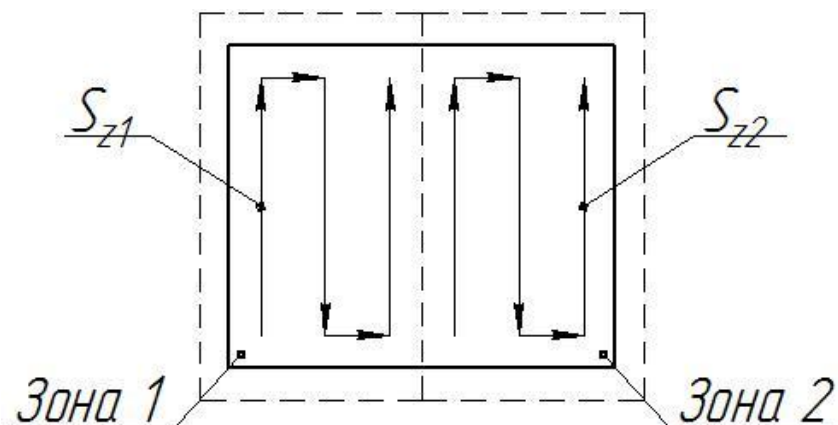


Рисунок 3.1 – Пример изменения режимов резания (подачи) для разных зон обработки

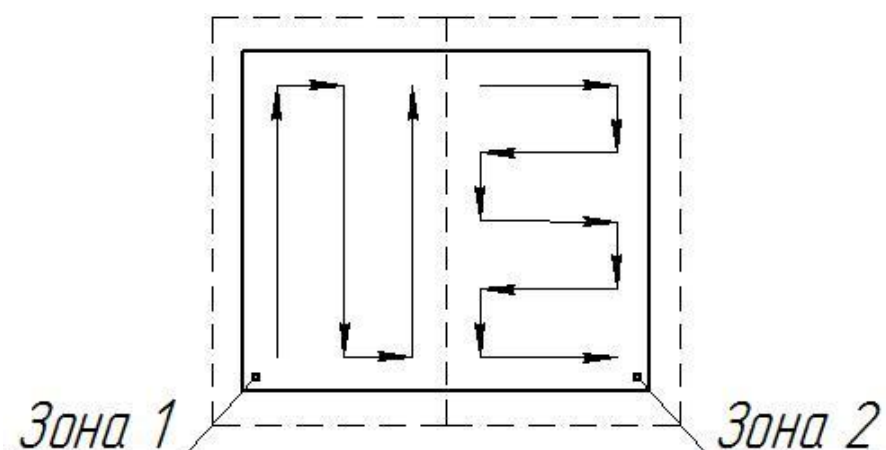


Рисунок 3.2 – Пример изменения траектории движения инструмента для разных зон обработки

В настоящее время на большинстве производств указанные выше методы управления для уменьшения погрешностей возникающих при фрезеровании деталей, имеющих пространственно – сложные формы на станках с ЧПУ почти не используются. А задание величины подачи и траектории движения инструмента осуществляется на основе личного опыта инженера – проектировщика.

В результате чего, при фрезерной обработке деталей имеющих пространственно – сложную форму происходит необоснованное заниженными режимами резания, а выбранные траектории, не всегда обеспечивают производительность, точность и качество получаемых поверхностей.

Использование перечисленных методов становится возможным лишь тогда, когда будет известно влияние геометрии зоны резания на величину силы резания.

3.1 Определение вида зависимости для расчета составляющих силы резания с учетом особенностей объемного фрезерования

Как говорилось ранее в настоящий момент существует огромное количество различных моделей, которые используются для определения основных параметров процесса резания [21]. В свою очередь их всех можно разделить на 2 основные группы по характеру расчёта – эмпирические и теоретические.

В практике наиболее применяются эмпирические модели, так как они достаточно просты и удовлетворяют критериям точности расчетов, тем не менее они не учитывают влияние многих факторов. С быстрым развитием электронно – вычислительных машин и усовершенствование систем САПР позволило применение более точных решений, которые основываются на теоретических моделях. Если рассматривать фрезу как лезвийный инструмент, то сила резания, возникающая в процессе фрезерования будет обуславливаться совокупностью сил, возникающих из – за пластические

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						45
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

деформации процесса стружкообразования, силы трения стружки по передней и задней поверхности режущей кромки и трения задней поверхности по отношению к обработанной поверхности. Конструкция формулы для определения составляющих сил резания имеет следующий вид (3.1):

$$P_z = \tau_1 \cdot a_1 \cdot a_1 \cdot F; \quad (3.1)$$

где τ_1 – сопротивление пластическому сдвигу, МПа;

a_1 – толщина сечения среза, м;

a_1 – ширина сечения среза, м;

F – некоторая функция, учитывающая особенности процесса резания.

Далее необходимо разработать математическую модель при контурном фрезеровании концевой сферической фрезой на стадии обработки чистовое фрезерование для расчета сил резания, это было рассмотрено в работах М. А. Даценко [22]. Тонкие сечения фрезы рассматривались в виде элементарных участков бесконечно малой длины. При этом появилась необходимость определения положение зубьев фрезы, которые участвуют непосредственно в процессе резания, произведение элементарной площадки на удельное давление стружки определяет силу стружкообразования. Схема действия составляющих сил резания на зуб фрезы представлена на рисунке 3.3.

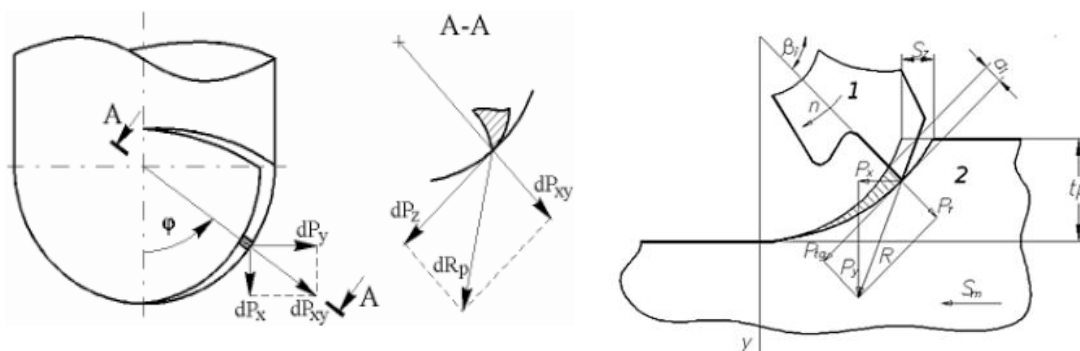


Рисунок 3.3 – Схема действия составляющих сил резания на зуб фрезы

Толщина сечения среза концевой фрезой представляется формулой обобщенным уравнением (3.2):

$$a_i(i, j, k) = S_z \cdot \sin[\beta(i, j, k)]; \quad (3.2)$$

где S_z – подача на зуб фрезы, мм/зуб;

$\beta(i, j, k)$ – угол контакта зуба концевой фрезы и заготовки, рад;

i, j, k – элементарные участки фрезы.

Для i -го дискового элемента в j -ом угловом положении фрезы на k -м зубе мгновенный угол контакта фрезы определится по формуле (3.3):

$$\beta(i, j, k) = [h_z(k - 1) - a_i(j)] + \left[\frac{b_i}{2} (i - 1) \right] \frac{\tan \omega}{r_{\text{фр}}}; \quad (3.3)$$

где $r_{\text{фр}}$ – радиус фрезы, м;

$a_i(j)$ – толщина сечения среза в j -ом угловом положении, м;

b_i – ширина сечения среза на i -ом участке зуба фрезы, м;

ω – угол наклона винтовых зубьев фрезы, рад;

h_z – шаг зубьев фрезы.

Тогда составляющие сил резания примет вид (3.4):

$$P_x = \sum_{j=1}^{n_a} \sum_{i=1}^{n_q} \sum_{k=1}^{n_z} \left[-K_R \cdot C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \sin^2 \beta(i, j, k) + \frac{C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \cos \beta(i, j, k) \sin \beta(i, j, k)}{n_a} \right], \quad (3.4)$$

$$P_y = \sum_{j=1}^{n_a} \sum_{i=1}^{n_q} \sum_{k=1}^{n_z} \left[K_R \cdot C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \sin \beta(i, j, k) \cdot \cos \beta(i, j, k) + \frac{C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \sin^2 \beta(i, j, k)}{K_R} \right];$$

где C_P , K_R , v – коэффициенты, зависящие от подачи S_z , радиальной t_p и осевой t_o глубины резания;

n_a, n_q, n_z – число элементарных участков соответственно для j, i, k .

Существенным недостатком приведенной модели является ее зависимость от экспериментальных данных.

3.2 Определение переменных параметров, входящих в аналитическую зависимость

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						47
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

В предыдущей главе было выявлено, что при многокоординатной обработке деталей имеющих поверхность пространственно – сложной формы со ступенчатым припуском концевыми сферическими фрезами, происходит непрерывное изменение параметров зоны резания. Одними из ключевых составляющих параметров, которые влияют на изменение параметров зоны резания является: толщина срезаемого слоя, положение и длина активной части режущей кромки. Наибольшее влияние на изменение этих параметров оказывает траектория движения инструмента, криво линейность режущей кромки и непостоянство снимаемого слоя. При расчете этих составляющих необходимо учитывать и тот фактор, что в процессе резания участвуют разные участки режущей кромки, которые снимают разный объем металла с различной скоростью резания. Это оказывает влияние на изменение угла сдвига и угла действия, которые изменяются на протяжении всей режущей кромки и, следовательно, они будут оказывать воздействие на значение и направление равнодействующей от силы пластического деформирования срезаемого слоя. В связи с этим необходимо разработать теоретические зависимости для определения переменных параметров зоны резания при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском, с целью аналитического расчета составляющих силы резания.

3.3 Расчетное определение геометрии срезаемого слоя при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей, концевыми торowymi фрезами

Для определения влияние геометрии ступенчатого припуска на составляющие силы резания при фрезеровании деталей имеющих пространственно – сложную форму концевыми радиусными фрезами на стадии чистовой обработки поверхности со ступенчатым припуском, необходимо произвести расчет геометрии среза сечения. Одной из проблем аналитического расчета геометрии срезаемого слоя при фрезеровании концевыми радиусными фрезами является тот факт, что расчет возможно произвести лишь с использованием компьютерного моделирования или

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						48
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

сложных математических зависимостей. Геометрия срезаемого слоя при фрезеровании концевыми радиусными фрезами деталей, имеющих пространственно сложную форму зависит от таких параметров, как: сечение профиля зуба, ширины строки фрезерования и глубины фрезерования.

Для расчета геометрии сечения срезаемого слоя с входящими в них углами изобразим схему обработки (рисунок 3.4). Выполнив анализ данной схемы, можно вывести следующие зависимости: вычленив прямоугольный треугольник ОАБ, из которого известны катет ОА, равный $r_{фр} - t$, и гипотенуза ОВ, равная $r_{фр}$. Из этого можно сделать вывод что, косинус угла θ будет равен отношению ОА к ОВ.

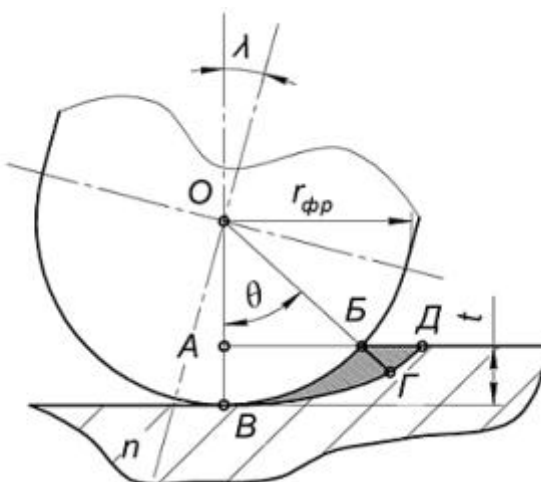


Рисунок 3.4 – Схема обработки ступенчатого припуска радиусной фрезой

При отсчете угла θ от оси n процесс резания будет происходить в диапазоне углов от λ до $\lambda + \arccos(1 - t/r_{фр})$. Однако, для расчета толщины сечения среза удобно принять следующий диапазон (3.5), исключив угол наклона оси инструмента λ .

$$\theta = \left[0; \arccos \left(1 - \frac{t}{r_{фр}} \right) \right]. \quad (3.5)$$

где t – глубина резания, м.

Значение толщины сечения среза, равное отрезку БГ из схемы к определению угла θ , можно получить из прямоугольного треугольника БДГ (3.6):

$$a_i = S_z \cdot \cos \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right). \quad (3.6)$$

Далее необходимо проанализировать изменения толщины сечения среза при повороте зуба фрезы Ψ . Значение толщины сечения среза с учетом поворота зуба фрезы выражается по следующей формуле (3.7):

$$a_i = S_z \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \Psi\right) \cdot \cos(\theta) = S_z \sin \Psi \cdot \sin \theta. \quad (3.6)$$

Схема, изображающая параметры сечения срезаемого слоя, представлена на рисунке 3.5.

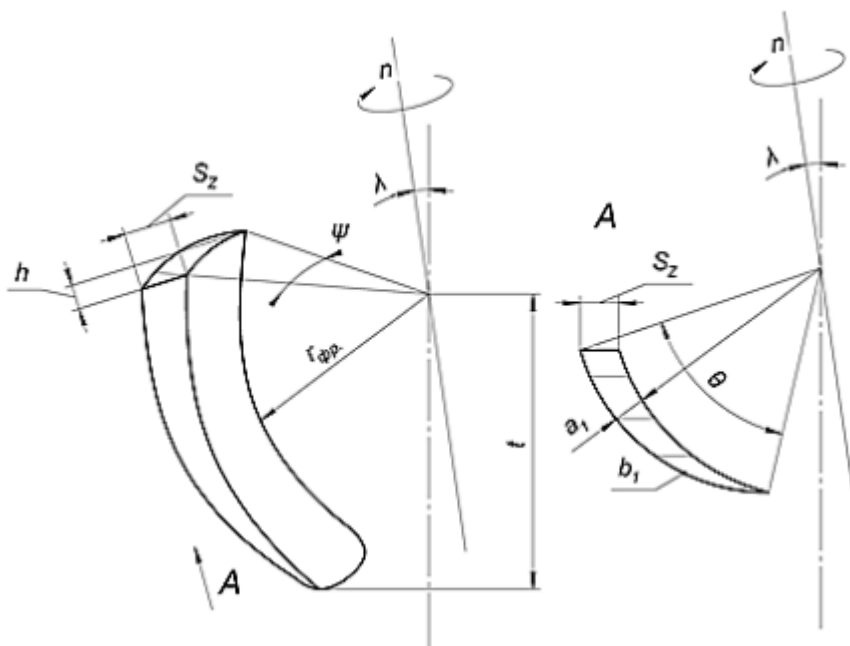


Рисунок 3.5 – Параметры срезаемого материала одним зубом концевой радиусной фрезы

Значение величины ширины сечения срезаемого слоя является постоянным по углу поворота фрезы и, на основании схемы, представленной на рисунке 3.5, и выражению, определяющему длину сегмента

$b_i = b = \int_{\alpha}^{\beta} r d\varphi$, где $\alpha = 0, \beta = \arccos\left(\frac{r_{\text{фр}} - t}{r_{\text{фр}}}\right)$, определяется согласно уравнению (3.7):

$$b_i = b = r_{\text{фр}} \cdot \arccos\left(1 - \frac{t}{r_{\text{фр}}}\right). \quad (3.7)$$

Максимальная глубина резания при которой только радиусная часть зуба концевой фрезы будет участвовать в процессе резания, определяется при помощи схемы представленной на рисунке 3.6.

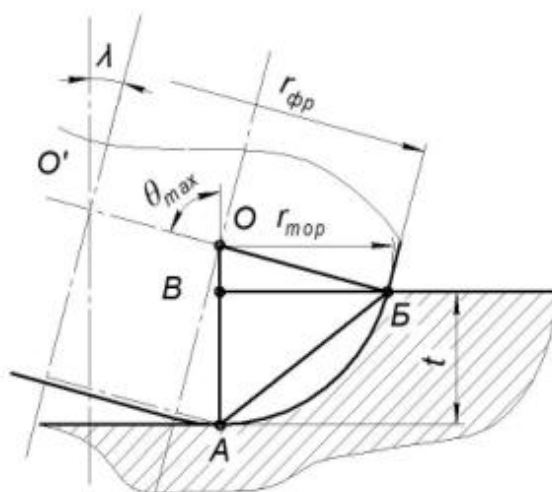


Рисунок 3.6 – Расчетная схема для определения максимальной глубины фрезерования

Рассмотрим треугольник ОВА. Он состоит из двух прямоугольных треугольников, а именно ОВВ и ВБА. Искомой стороной является сторона ВА треугольника ВБА. Она и будет определять максимальную глубину резания. Зная, что сторона ОВ равна r , из треугольника ОВВ можно выразить сторону ОВ. Она будет равна $r \cdot \arccos(\theta)$. При максимальной глубине резания значение угла θ_{max} можно определить, как $(0,5 \cdot \pi \cdot \lambda)$, где λ угол наклона оси инструмента (3.8). Зная длину стороны ОА равную r , можно найти искомую ВА.

$$t_{max} = r \cdot (1 - \sin(\lambda)). \quad (3.7)$$

Таким образом, адекватность зависимостей (3.6), (3.7) гарантируется в диапазоне глубин резания до t_{max} . Также из данной формулы можно получить значение максимального угла λ_{max} , на который можно отклонять ось инструмента от вертикальной оси, при этом производя обработку радиусной частью фрезы (3.8).

$$\lambda_{max} = \arcsin\left(1 - \frac{t}{r}\right). \quad (3.8)$$

3.4 Расчет положения и длины активной части режущей кромки при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей концевыми радиусными фрезами.

Другими геометрическими параметрами зоны резания являются положение и длина активной части режущей кромки. При любых траекториях движения концевой радиусной фрезы, обрабатывающей пространственно – сложные поверхности, происходит перемещение и изменение величины контакта инструмента с заготовкой вдоль криволинейной режущей кромки.

Это происходит из – за наличия трех и более взаимосвязанных движений инструмента и заготовки, ее конфигурации и величины ступенчатого припуска (высота, ширина ступенек).

Следует отметить, что большинство деталей машиностроения ограничено достаточно простыми поверхностями, сечения которых состоят из сопряжения отрезков прямых и дуг окружностей. К поверхностям, которые формируют большинство деталей машиностроения относятся: плоскость, цилиндр, конус, сфера, тор и т.п. Любую сложную криволинейную поверхность можно аппроксимировать набором простых поверхностей. Поэтому в данной работе проведено исследование по аналитическому определению величины и положения активной части режущей кромки в каждый момент поворота зуба фрезы при обработке такой простой геометрической поверхности, как плоскость, произвольно ориентированной в пространстве.

При чистовом фрезеровании деталей пространственно-сложной формы наиболее распространена обработка строчками. При фрезеровании строчки, смещенной на величину периодической подачи, «пятно контакта» ограничено на сферической части фрезы цилиндрической поверхностью Π_1 , а на коническом (или цилиндрическом для цилиндрических фрез) участке – плоскостями Π_5, Π_6 (рисунок 3.7).

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	<i>Лист</i>
						52
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

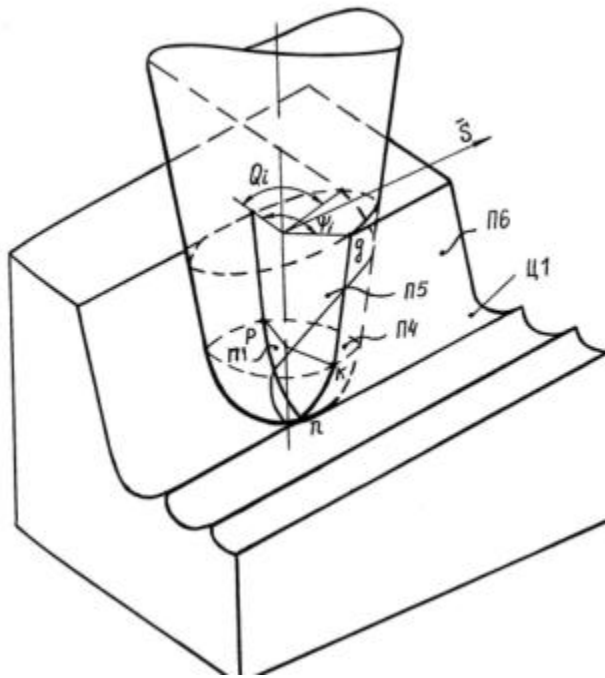


Рисунок 3.7 – Схема обработки наклонной плоскости

Цилиндрическая поверхность Ц₁ предыдущей строки смещена на величину периодической подачи $S_{\text{пер}}$ от обрабатываемой строчки, ее уравнение в координатах фрезы запишется:

$$\left(X - S_{\text{пер}} \sin(\eta)\right)^2 + \left[Y \cos \alpha - (Z - S_{\text{пер}} \cos(\eta) \sin^2 \alpha)\right]^2 = r_{\text{ф}}^2; \quad (3.9)$$

Решая уравнение получим:

$$\left(r_{\text{ф}} \sin \Phi_{\text{в2}} \cdot \cos \psi - S_{\text{пер}} \sin \eta\right)^2 + \left(r_{\text{ф}} \sin \Phi_{\text{в2}} \cdot \sin \psi + (r_{\text{ф}} \cos \Phi_{\text{в2}} + S_{\text{пер}} \cos \eta) \sin \alpha\right)^2 = r_{\text{ф}}^2; \quad (3.9)$$

Сферического участка фрезы $n_{\text{кр}}$. Поскольку линии np и pk , ограничивающие «пятно контакта», образованы пересечением сферы с плоскостями Π_1 и Π_4 , они описываются уравнениями (3.10):

$$\Phi_{\text{н}} = \arctg \left(\frac{\text{ctg} \alpha}{\sin \Phi} \right) \quad (3.10)$$

Уравнение плоскости Π_5 представляется уравнением:

$$-X \frac{\Delta}{2} \cos \Psi_i + Y \frac{\Delta}{2} \sin \Psi_i = 0; \quad (3.11)$$

Решая уравнение (3.11), получаем граничные значения углов, определяющих положение и величину активной части режущей кромки:

$$Q_{i\text{вых}} = \begin{cases} v_i, & \text{при } v_i < \Psi_i \\ \Psi_i, & \text{при } v_i \geq \Psi_i \end{cases} \quad (3.12)$$

В общем случае пятно контакта недеформируемого инструмента с пластичной поверхностью представляют собой пространственную фигуру, образованную на инструменте (торе, цилиндре, шаре) пересечением пластичной поверхности детали – чаще всего цилиндра. Поэтому для нахождения площади пятна контакта необходимо решить задачу о пересечении двух пространственных фигур.

В нашем случае рассмотрим поверхность контакта в виде тора по внешней сферической поверхности.

Уравнение поверхности тора, в декартовой системе координат запишется (3.13):

$$z = \sqrt{r^2 - (\sqrt{x^2 + y^2} - R)^2}; \quad (3.13)$$

Переходя к цилиндрической системе координат, найдем частные производные (3.14):

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(R-\rho) \cos \varphi}{\sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}}, \quad \frac{dz}{dy} = \frac{(R-\rho) \sin \varphi}{\sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}}. \quad (3.14)$$

Далее находим элемент площади (3.15):

$$dS = \sqrt{1 + \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} dx dy = \frac{r}{\sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}} \rho d\rho d\varphi; \quad (3.15)$$

Вычисляем площадь поверхности в цилиндрической системе координат по формуле (3.16):

$$S = \iint_D \frac{r}{\sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}} \rho d\rho d\varphi \quad (3.16)$$

Область интегрирования D ограничена с одной стороны уравнением окружности сечения цилиндра, а с другой стороны уравнением внешней окружности тора $\rho = R$, тогда в полярной системе координат площадь поверхности пятна вычисляется по формуле (3.17):

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$S = 4 \int_0^\alpha d\varphi \int_{\rho=a \cos \varphi - \sqrt{a^2(\cos^2 \varphi - 1) + b^2}}^{\rho=R+\gamma} \frac{r}{\sqrt{r^2 - (\rho - R)^2}} \rho d\rho . \quad (3.17)$$

Исходя из формул, приведенных выше можно построить диаграмму пятен контакта фрезы и обрабатываемой поверхности на стадии чистового фрезерования после операции чернового фрезерования концевыми торовыми и цилиндрическими фрезами (рисунок 3.8).

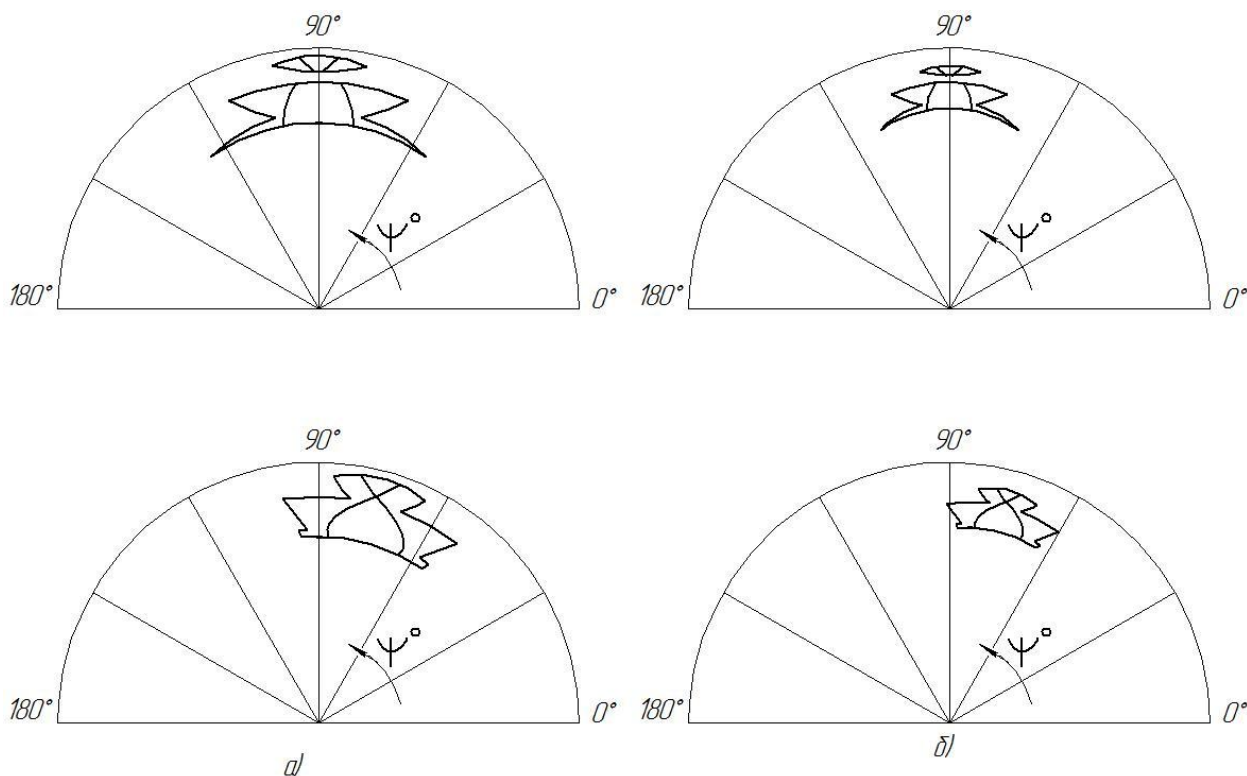


Рисунок 3.8 – Диаграмма «пятен контакта» фрезы со ступенчатым припуском
 а – при получении ступенчатого припуска цилиндрической фрезой,
 б – при получении ступенчатого припуска торовой фрезой

$$\alpha = 30^\circ; \theta = 0 - 15^\circ; R = 6\text{мм}; dz = 2\text{мм}$$

3.5 Расчет составляющих силы резания

Проведенное выше определение переменных параметров (толщина среза в каждой точке режущей кромки, положение, длина и количество активных частей режущей кромки, переменные углы сдвига и действия), которые должны участвовать при расчете сил резания, позволяет с учетом

формул (3.4 – 3.8), для условий фрезерования пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском.

При фрезеровании пространственно – сложной поверхности, имеющей ступенчатый припуск, в зоне контакта фрезы и заготовки могут находиться несколько “пятен контакта”, следовательно, в работе будет участвовать несколько участков режущей кромки. Кроме того, в работе одновременно может находиться несколько зубьев фрезы. Поэтому, с учетом количества участков активной части режущей кромки и количества зубьев фрезы окончательно получим:

$$P_x = \sum_{j=1}^{n_a} \sum_{i=1}^{n_q} \sum_{k=1}^{n_z} \left[-K_R \cdot C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \sin^2 \beta(i, j, k) + \frac{C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \cos \beta(i, j, k) \sin \beta(i, j, k)}{n_a} \right], \quad (3.18)$$

$$P_y = \sum_{j=1}^{n_a} \sum_{i=1}^{n_q} \sum_{k=1}^{n_z} \left[K_R \cdot C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \sin \beta(i, j, k) \cdot \cos \beta(i, j, k) + \frac{C_P \cdot a \cdot S_z \cdot \sin^2 \beta(i, j, k)}{K_R} \right];$$

где C_P , K_R , v – коэффициенты, зависящие от подачи S_z , радиальной t_p и осевой t_o глубины резания;

n_a, n_q, n_z – число элементарных участков соответственно для j, i, k .

Расчет составляющих силы резания по зависимостям (3.4 – 3.8) производится в следующей последовательности.

1. Назначаются исходные данные (физико – механические свойства стали; частота вращения фрезы — n ; подача на зуб — S_z ; радиус фрезы — R ; количество зубьев фрезы — z ; угол наклона обрабатываемой поверхности в направлении подачи — λ ; угол поворота ступенек припуска относительно вектора подачи — θ ; высота ступенчатого припуска — i, j, k).

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. По формулам (3.19), (3.20), (3.21), (3.23) рассчитываются “пятна контакта” фрезы с припуском, т.е. определяются пределы интегрирования.

3. С любым заданным шагом угла ψ поворота зуба фрезы по формулам (3.9 – 3.17) рассчитываются толщины среза для элементарных участков активной части режущей кромки участвующих в работе (в пределах “пятна контакта” фрезы с припуском).

4. Для каждого элементарного участка активной части режущей кромки определяются углы β .

5. Для каждого элементарного участка активной части режущей кромки рассчитываются все три составляющие силы резания.

6. С учетом количества участков активной части режущей кромки и количества зубьев фрезы, участвующих в работе, проводится расчет составляющих силы резания.

ВЫВОДЫ

1. При обработке пространственно – сложной поверхности со ступенчатым припуском концевыми радиусными фрезами происходит значительное изменение параметров зоны резания (толщины срезаемого слоя, длины и положения активной части режущей кромки).

2. Толщина среза, измеряемая в сечениях перпендикулярных к профилю фрезы (поверхности резания), зависит от направления вектора подачи относительно оси вращения фрезы и величины ступенчатого припуска. С учетом углов наклона обрабатываемых поверхностей и усечения плоскостями, формирующими ступенчатый припуск, она может быть определена по формулам (3.7).

4. Использование полученных данных в аналитических силовых зависимостях позволяет количественно рассчитать влияние изменяющихся геометрических параметров зоны резания на нестабильность сил резания.

5. Разработана методика расчета составляющих силы резания, и получены аналитические зависимости (3.32), (3.33) и (3.34), учитывающие

					<i>150405.2017.200.261.ПЗ.</i>	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

закономерность изменения сил резания в зависимости от углов наклона обрабатываемой поверхности и ее конфигурации, выраженной через положение, длину и количество участков активной части режущей кромки, высоту ступенек, толщину среза, величины рабочей подачи, физико – механических свойств обрабатываемого материала.

6. В процессе фрезерования пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском изменение геометрических параметров зоны резания приводит к изменению составляющих силы резания, P_x и P_y более чем в 1,5 раза в пределах малых линейных перемещений инструмента.

Наличие значительной неустойчивости сил при объемном фрезеровании вызывает необходимость в учете ее влияния на точность обработки.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ПРОСТРАНСТВЕННО – СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОНЦВЫМИ ФРЕЗАМИ

4.1 Влияние геометрических параметров концевых фрез на остаточный припуск при фрезеровании пространственно сложных поверхностей

Для проверки адекватности расчетного определения параметров качества обработанной поверхности слоя деталей при фрезеровании концевыми торowymi и цилиндрическими фрезами были проведены расчеты значений остаточных гребешков и их влияние на составляющие силы резания на стадии чистового фрезерования.

В предыдущей главе было выявлено, что при многокоординатной обработке деталей имеющих поверхность пространственно – сложной формы со ступенчатым припуском концевыми сферическими фрезами, происходит непрерывное изменение параметров зоны резания. Одними из ключевых составляющих параметров, которые влияют на изменение параметров зоны резания является: толщина срезаемого слоя, положение и длина активной части режущей кромки, в свою очередь величина этих параметров зависит от профиля инструмента, с помощью которого производится обработка. Одним из факторов который является радиус кромки торовой фрезы. На рисунке 4.1 показана зависимость в процентном соотношении увеличения площади остаточного припуска при увеличении радиуса кромки торовой фрезы.

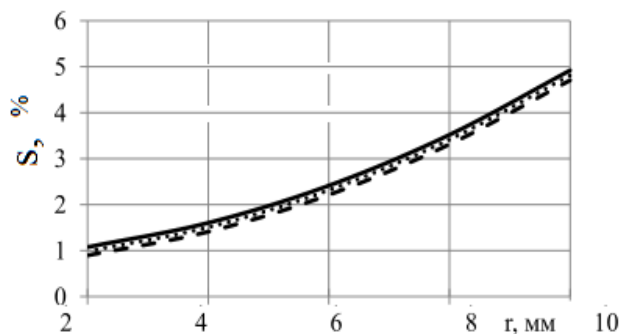


Рисунок 4.1 – Зависимость площади остаточного припуска от радиуса режущей кромки торовой фрезы.

На графиках, показанных на рис. 4.2 и 4.3 приведено изменение длин режущих кромок для разных условий фрезерования, из которых видно, что при изменении углов наклона обрабатываемой поверхности в направлении вектора подачи и перпендикулярном ему длина активной части зуба фрезы изменяется в 1,5...3 раза. При фрезеровании участков контура различной кривизны происходит значительное изменение угла контакта фрезы и детали (рисунок 4.4 и 4.5). Угол контакта может изменяться в 1,2...1,5 раза в зависимости от диаметра применяемой фрезы и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности. Это влечет за собой изменение длины активной части режущих кромок.

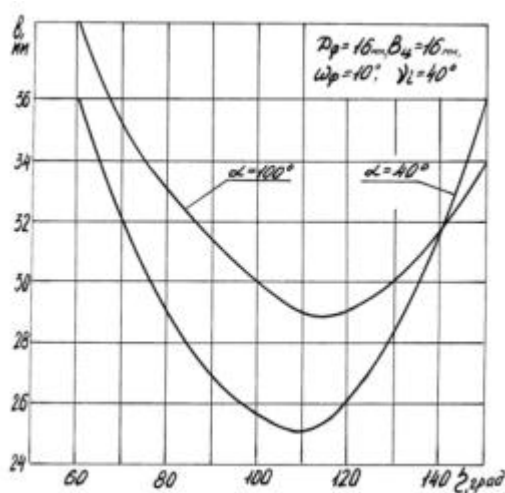


Рисунок 4.2 – Изменение длины активной части режущей кромки фрезы в зависимости от углов наклона обрабатываемой поверхности при $D_f = 16 \text{ мм}$, $B_d = 16 \text{ мм}$, $\omega_f = 10^\circ$

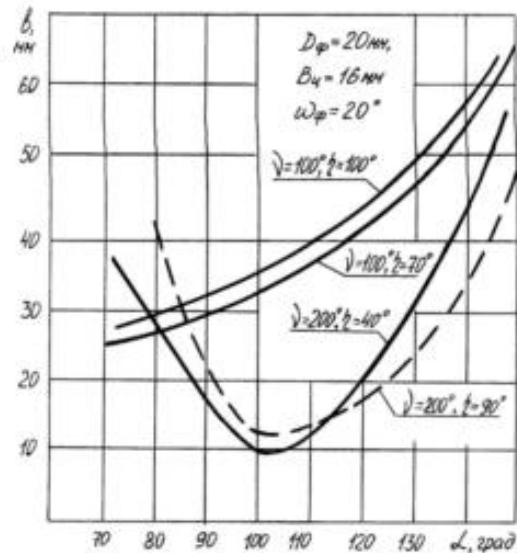


Рисунок 4.2 – Изменение длины активной части режущей кромки фрезы в зависимости от углов наклона обрабатываемой поверхности при $D_f=20$ мм, $B_c = 16$ мм, $\omega_f = 10^\circ$

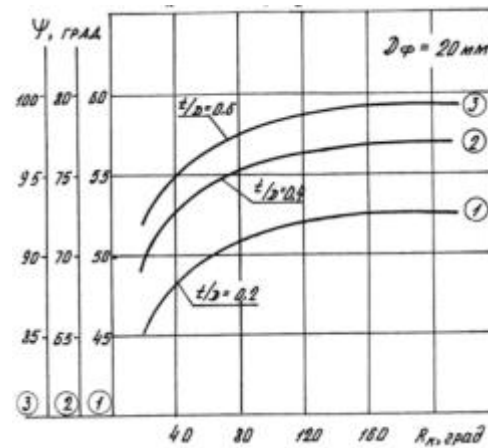


Рисунок 4.3 – Зависимость угла контакта фрезы от радиуса кривизны обрабатываемого контура (выпуклый контур)

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

150405.2017.200.261.ПЗ.

Лист

61

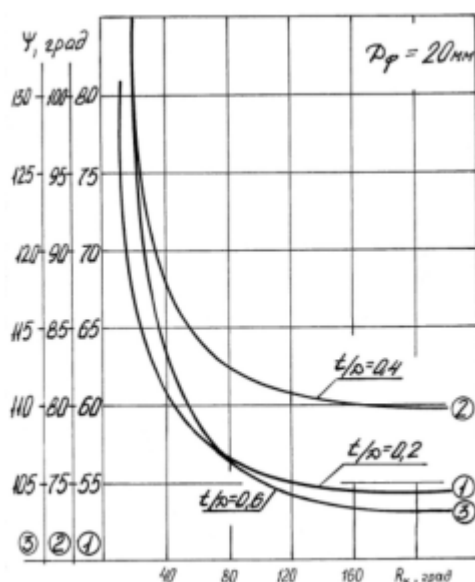


Рисунок 4.4 – Зависимость угла контакта фрезы от радиуса кривизны обрабатываемого контура (вогнутый контур)

Таким образом, при обработке пространственно – сложных поверхностей концевыми цилиндрическими и торовыми фрезами имеет место значительное изменение геометрических параметров зоны резания, а именно толщины срезаемого слоя, положения и длины активной части режущих кромок. Это обусловлено многовариантностью взаимосвязанных факторов обработки (глубина и ширина фрезерования, геометрические параметры инструмента, радиус кривизны обрабатываемого контура, углы наклона обрабатываемой поверхности, режимы резания).

4.2 Влияние геометрических параметров концевых торовых фрез на силы резания

Выше был произведен анализ влияние геометрии режущего инструмента (концевых торовых и цилиндрических фрез) на геометрические параметры полученного припуска на стадии черного фрезерования. На основе формул, выведенных в третьей главе и подставив значение в формулы, можно адекватно оценить влияние остаточного припуска на составляющие силы резания при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей на стадии чистового фрезерования концевой радиусной фрезой (рисунок 4. 5).

Под буквой А показано процентное соотношение величины равнодействующей сила P_{zy} возникающей при обработке ступенчатого припуска, образованного на стадии черного фрезерования концевой цилиндрической фрезой, под В соответственно – торовой.

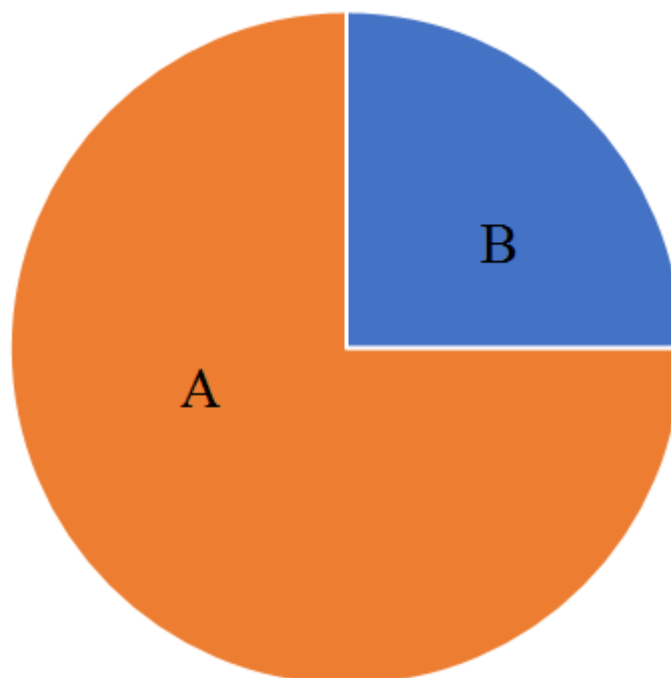


Рисунок 4.6 – Процентное соотношение равнодействующей силы P_{zy}

Общие выводы

1. Разработана методика расчета составляющих силы резания с учетом геометрических параметров зоны резания при фрезеровании пространственно – сложной поверхности со ступенчатым припуском. Данная методика позволяет рассчитать составляющие силы резания с учетом непрерывно изменяющихся в процессе объемного фрезерования толщины срезаемого слоя, положения и длины активной части режущей кромки.

2. В процессе объемного фрезерования пространственно – сложных поверхностей со ступенчатым припуском изменение геометрических параметров зоны резания приводит к изменению составляющих силы резания P_x , P_y более чем в 1,5 раза в пределах малых линейных перемещений инструмента.

3. Нестабильность сил резания приводит к возникновению погрешности размера динамической настройки, которая изменяется более чем в 4 раза на разных участках пространственно – сложной поверхности.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батуев, В.А. Повышение производительности и точности фрезерования пространственно – сложных поверхностей на станках с ЧПУ путем стабилизации сил резания: дис. канд. техн. наук / В.А. Батуев. — Саратов: Саратовский политехнический институт, 1986. — 248 с.

2. Гузеев, В.И. Теория и методика производительности контурной обработки деталей разной точности на токарных и фрезерных станках с ЧПУ: дис. ... докт. техн. наук / В.И. Гузеев. — Челябинск: ЧГТУ, 1994. – 517 с.

3. Сарбанов, С.Т. Анализ структур операций фрезерования сложных поверхностей на станках с ЧПУ с целью повышения точности и производительности обработки: дис. ... канд. техн. наук / С.Т. Сарбанов. — М., 1978. —184 с.

4. Беспрозванный И.В. Основы теории резания металлов. М.: Машгиз, 1948,- 132 с.

5. Батуев, В.В. Влияние положения и длины активной части режущей кромки на составляющие силы резания при фрезеровании пространственно – сложной поверхности со ступенчатым припуском / В.В. Батуев // Известия вузов. Машиностроение. — 2006. — №10. — С. 23–24.

6. Батуев, В.В. Расчет толщины срезаемого слоя при фрезеровании пространственно – сложных поверхностей, имеющих ступенчатый припуск /В.В. Батуев // Известия Челябинского научного центра. Челябинск: ЮУрГУ, 2006.

7. Гузеев, В.И. Влияние допущений принятых в расчетах толщины срезаемого слоя на составляющие силы резания при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей / В.И. Гузеев, В.В. Батуев // Современные технологии и бизнес : сб. науч. тр. — Челябинск: Издание ЧНЦ РАЕН, ЧРО МААНОИ, ЧООО РС НИО, ЧелЦНТИ, 2006. — С. 33–36.

8. Гузеев, В.И. Теория и методика производительности контурной обработки деталей разной точности на токарных и фрезерных станках с ЧПУ: дис. докт. техн. наук / В.И. Гузеев. — Челябинск: ЧГТУ, 1994. – 517 с.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

9. Выбойщик, А.В. Повышение точности и производительности фрезерования пространственно – сложных поверхностей на станках с ЧПУ: дис. канд.техн.наук / А.В. Выбойщик. — Челябинск: ЮУрГУ, 2000. — 181с.

10. Балакшин, Б.С. Автоматизация управления технологическим процессом с целью повышения точности и производительности обработки /Б.С. Балакшин // Самоподнастраиваемые станки. – М.: Машиностроение, 1970. – С. 7–50.

11. Аверьянова И.О., Виноградов А.В., Продан Р.К. Построение геометрической модели и разработка управляющей программы / И.О. Аверьянова, А.В. Виноградов, Р.К. Продан - М.: МГИУ, 2009. - 35 с.

12. Аверьянова И.О., Продан Р.К., Виноградов А.В. Разработка управляющих программ для системы управления класса CNC с применением DXF – файлов. Приводная техника, №4 (92), август 2011. – с. 29 – 32.

13. Автоматизированное проектирование и производство в машиностроении/Ю.М. Соломенцев, В.Г. Митрофанов, А.Ф. Прохоров и др.; Под общ. ред.Ю.М. Соломенцева, В.Г. Митрофанова. – М.: Машиностроение, 1986. – 256 с.

14. Адаме Д., Роджерс Д. Математические основы машинной графики. М. : Мир, 1980. – 240 с.

15. Баландин А.Д. Синтез и анализ поверхностей сложной формы // Станки и инструмент – 1988. – №3. – с. 16 – 18.

16. Ивахненко А.Г. Повышение эффективности ранних стадий проектирования металлорежущих станков на основе структурного синтеза формообразующих систем. Дисс. д-ра техн. наук: спец. 05.03.01. Москва, СТАНКИН. – 1998.

17. Талантов, Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

18. GARANT. Machining Handbook [Справочник по обработке резанием].

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						66
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

19. Розенберг, А.М. Исследование сил резания при работе цилиндрическими твердосплавными фрезами по черным металлам / А.М. Розенберг, Ю.А. Розенберг, С.И. Тахман. — В кн.: Фрезы.М.: НИИмаш, 1968, с. 370–382.

20. Розенберг, Ю.А., Тахман, С.И. Повышение точности обработки на копировально-фрезерных станках с ЧПУ / Ю.А. Розенберг, С.И. Тахман//Вестн. машиностроения. — 1973. — №12. — С. 41–45.

21. Башаров, Р. Р. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка. /Р. Р. Башаров, Р. Г. Кудояров // Вестник УГАТУ. – 2012. – №4(49). – С. 71–77.

22. Даценко, М. А. Моделирование сил резания при контурном фрезеровании концевыми фрезами [Текст] М. А. Даценко, А. М. Стапаненко, П. А. Усачев, [и др.] // Вісник Сумського держаного університету. Технічні науки. – 2010. – № 4. – С. 154–158.

					150405.2017.200.261.ПЗ.	Лист
						67
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		