

ФГБОУ ВО «ЮГО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



**Пономарев Василий Владимирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФРЕЗ-ПРОТЯЖЕК  
ДЛЯ ОБРАБОТКИ РК-ПРОФИЛЬНЫХ ВАЛОВ**

Специальность: 2.5.5 Технологии и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

д. т. н., доцент

Куц Вадим Васильевич

Курск – 2023

## Содержание

Введение.....	5
Глава 1. Анализ состояния вопроса .....	11
1.1. Современные области применения РК-профильных соединений.....	11
1.2. Анализ существующих методов изготовления наружных РК-профильных поверхностей.....	13
1.3. Описание способа формообразования фрезерованием с продольной подачей и синтез производящей поверхности фрезы.....	17
1.4. Обоснование целесообразности применения фрезы-протяжки оснащенной СМП.....	20
1.5. Определение критериев оценки работоспособности фрезы-протяжки оснащенной СМП.....	21
1.6. Выводы.....	23
Глава 2. Построение математической модели сборной фрезы-протяжки для обработки РК-профильных ступеней валов .....	24
2.1 Построение уравнения производящей поверхности фрезы-протяжки для обработки РК- профильных ступеней валов .....	24
2.2 Моделирование режущих кромок сменных многогранных пластин ..	27
2.3 Моделирование схемы установки СМП в корпусе фрезы-протяжки..	36
2.4 Построение уравнения поверхности резания, описываемой режущими кромками фрезы-протяжки в процессе работы.....	38
2.5 Выводы.....	39
Глава 3 Разработка методов расчета оценочных параметров процесса фрезепротягивания РК-профильных ступеней валов .....	40

3.1 Разработка метода расчета погрешности формообразования поверхности РК – профиля при обработке сборной дисковой фрезой-протяжкой .....	40
3.2 Разработка метода расчета параметров срезаемых слоёв.....	46
3.3 Разработка метода расчета стойкостных характеристик сборной дисковой фрезы-протяжки при обработке РК-профильных ступеней валов .....	51
3.4 Разработка методики корректирования положения зубьев при их добавлении для снижения неравномерности их периода стойкости.....	55
3.5 Исследование изменения крутящего момента при обработке РК-профиля фрезой-протяжкой .....	62
3.6 Выводы.....	64
Глава 4 Экспериментальное исследование процесса обработки РК-профильной поверхности фрезой-протяжкой .....	66
4.1 Разработка прототипа сборной фрезы-протяжки для проведения экспериментального исследования .....	66
4.2 Создание экспериментальной установки для проведения опытной обработки РК-профильных ступеней.....	70
4.3 Результаты измерения геометрических параметров обработанной поверхности. ....	72
4.4 Выводы.....	76
Глава 5. Моделирование конструкции сборной фрезы-протяжки.....	77
5.1 Выбор варианта конструкции сборной фрезы-протяжки.....	77
5.2 Анализ схем вариантов крепления сменных многогранных пластин .	78
5.3 Определение основных параметров проектируемой фрезы.....	82
5.4 Выбор типовой конструкции фрезы-протяжки оснащенной СМП .....	84
5.5 Определение положение в пространстве элементов крепления конструкции пластин и трехмерное моделирование фрезы-протяжки. ....	86

5.6 Выводы.....	91
Заключение .....	93
Список использованной литературы .....	96
Приложение 1 .....	111
Приложение 2 .....	112
Приложение 3 .....	114

## Введение

**Актуальность работы.** РК-профильные соединения применяются вместо шлицевых и шпоночных соединений для передачи крутящего момента между сопрягаемыми профильными поверхностями деталей машин и механизмов. Данные соединения имеют ряд эксплуатационных и технологических преимуществ – выше долговечность, ниже шумность, меньшая металлоемкость и более высокий КПД по сравнению со шлицевыми и шпоночными соединениями.

В настоящее время применение в современном производстве РК-профилей ограничивается трудоемкостью получения рабочих поверхностей деталей в данном соединении. Несмотря на то, что на сегодняшний день известно множество методов обработки РК-профильных валов, они остаются достаточно трудоемкими и нетехнологичными.

Известные методы обработки основаны на применении гармонических возвратно-поступательных движений инструмента и/или заготовки, количество ходов которых за один оборот заготовки синхронизировано с числом граней профиля, что не может не сказываться на точности и производительности обработки. Суть данных методов изложена в работах Ковтуна Д. А., Тимченко А. И., Мюсиля Р., Зенина Н. В., Борович Л. С. и др. Применение данных методов обработки приводит к необходимости в создании специального оборудования и/или приспособлений, что повышает затраты на подготовку производства. В единичном и мелкосерийном производстве для этих целей используются станки с ЧПУ.

Также применяется обработка специальным инструментом как методом копирования с делительным движением заготовки, что освещено в работах Шитикова А. Н., Понкратова П. А., так и методом огибания специальной червячной фрезой предложенным Волковским С. В. Данные методы предполагают изготовление сложнопрофильного инструмента и имеют технологические ограничения по форме и размерам обрабатываемых РК-профильных поверхностей.

В условиях серийного и массового производства нашло применение обработка специальным инструментом – фрезой с конструктивной радиальной подачей, для обработки РК-профильных ступеней за один оборот инструмента и детали, данный подход представлен в трудах Мальневой Ю. А. Недостатком данного метода является ограничение размера обрабатываемой поверхности.

Из вышесказанного следует, что научная задача, состоящая в создании нового производительного и технически эффективного способа обработки РК-профильных ступеней валов при крупносерийном и массовом производстве основанного на идее применения фрезы-протяжки с осевой подачей и метода проектирования подобного инструмента, является актуальной.

**Цель работы** заключается в разработке и исследовании конструкции фрезы-протяжки для обработки РК-профильных ступеней валов, оснащенной сменными многогранными пластинами (СМП), расположенными с неравномерным угловым шагом, на основе методов математического моделирования процесса формообразования, съема припуска и определения взаимосвязей конструкторских и технологических решений.

**Объектом исследования** является сборная фреза-протяжка для обработки РК-профильных ступеней, оснащенная СМП.

**Предметом исследования** является процесс проектирования сборной фрезы-протяжки для обработки наружных РК-профильных ступеней с заданной точностью обработки поверхности на основе установленных взаимосвязей и закономерностей процесса фрезепротягивания.

**Область исследований.** Содержание диссертации соответствует паспорту специальности п.2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических, химических и комбинированных воздействий» и п.4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и

экономически эффективные процессы обработки» специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

#### **Задачи исследования:**

1. Разработать способ обработки наружных РК-профильных ступеней валов с использованием простых взаимосвязанных движений вращения детали и инструмента, осевой подачи, а также построить уравнение производящей поверхности.

2. Исследовать, на основе разработанных методов расчета, влияние геометрических параметров фрезы-протяжки (среднего диаметра, числа зубьев и их угловое положения) на погрешность формообразования РК-профиля валов и изменения стойкостных характеристик зубьев.

3. Разработать методы расчета угловых положений режущих зубьев фрезы-протяжки, обеспечивающих постоянство величины погрешности формообразования профиля обработанного вала и снижение величины неравномерности износа режущих зубьев.

4. Исследовать методами компьютерного моделирования силовые характеристики процесса обработки фрезой-протяжкой РК-профильной поверхности.

5. Разработать методику проектирования сборной фрезы-протяжки со сменными многогранными пластинами (СМП) для обработки наружных РК-профильных поверхностей, обеспечивающую заданную производительность обработки и на ее основе спроектировать опытный образец фрезы-протяжки и выполнить экспериментальное исследование процесса формообразования РК-профильных валов.

#### **Методы исследований**

Исследование процесса формообразования наружной РК-профильной поверхности выполнялись на основе положений теории резания, геометрической теории проектирования режущего инструмента, математического и компьютерного моделирования процессов формообразования.

Обработка результатов моделирования и проведенных экспериментов выполнялась с применением математического аппарата программных комплек-

сов Maple, DEFORM и Excel. Проектирование конструкции инструмента и его прототипа выполнялась методами 3D-моделирования в САПР КОМПАС-3D.

Экспериментальные исследования проводилось с применением измерительного стенда с индикатором ИЧ-10 и др.

**Научная новизна** Научная новизна работы заключается в установленных закономерностях процесса формообразования и съёма припуска при обработке РК-профильных валов фрезой-протяжкой с осевой подачей инструмента в условиях неравномерного припуска и углового расположения режущих зубьев инструмента.

#### **Положения новизны, выносимые на защиту**

1. Способ обработки РК-профильных ступеней валов фрезой-протяжкой с осевой подачей, уравнение ее производящей поверхности и результаты моделирования процесса формообразования.

2. Методика определения углового положения зубьев фрезы-протяжки для достижения заданной точности формы профиля и постоянства величины погрешности формообразования, а также их количества.

3. Методика оценки периода стойкости зубьев фрезы при неравномерном угловом положении зубьев с учетом переменной величины подачи на зуб, диаметра, глубины резания и ширины обработки, а также методика корректирования положения зубьев при их добавлении для снижения неравномерности периода стойкости зубьев фрезы.

4. Результаты компьютерного моделирования процесса работы фрезы-протяжки.

5. Разработанная конструкция фрезы-протяжки, методика ее проектирования и результаты натурных экспериментальных исследований процесса формообразования.

**Реализация результатов.** Результаты работы внедрены на предприятиях машиностроительного профиля Курской области, что подтверждено соответствующими актами.

**Практическая значимость работы** заключается в разработке конструкции фрезы-протяжки с радиальной конструктивной подачей и осевой подачей (Патент № 2728269), а также разработке программы для ЭВМ для расчета конструктивных параметров сборной дисковой фрезы для обработки протяженных длинных валов (Свидетельство № 2020611659).

**Апробация работы:** Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научно - практических конференциях: Международной научно-технической конференции «Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники» (Брянск, 2020), Международной молодежной научно-практической конференции «Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование» (Курск, 2021), Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2022), Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы» (Ростов-на-Дону, 2022), Всероссийской национальной научно-технической конференции с международным участием «Прогрессивные технологии и процессы» (Курск, 2022), Международная научно-техническая конференция «Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли» (Брянск, 2022). Всероссийская научная конференция «Перспективное развитие науки, техники и технологий» (Курск, 2022).

В полном объеме диссертация была заслушана и одобрена на расширенном заседании кафедры «Машиностроительных технологий и оборудования» Юго-западного государственного университета.

#### **Публикации.**

Общий объем публикаций по теме работы составляет свыше 4,2 печ. л. из них соискателю принадлежит не менее 2,5 печ. л. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных журналах

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, библиографии (источников). Работа выполнена на 115 страницах и содержит 60 рисунков, список использованной литературы из 125 наименований, 3 таблицы, 3 приложения.

## Глава 1. Анализ состояния вопроса

### 1.1. Современные области применения РК-профильных соединений

Вопрос передачи крутящего момента возник одновременно с появлением механизмов с вращающимися деталями. Применению разнообразных профильных соединений способствовало развитие производства часовых механизмов, где они применялись для передачи вращения между деталями. Для этого в разные периоды времени применялись профильные соединения, такие как равноосные, циклоидные, синусоидальные, с кривыми «Венгерского профиля» в таких соединениях, но наиболее широко применялись профильные соединения с некруглым профилем - трех- или четырехгранной формы. Нетехнологичность подобных соединений с развитием машиностроения привело к постепенному вытеснению их шлицевыми и шпоночными соединениями [93, 94, 107, 108, 109, 118, 119].

Профильные соединения для передачи крутящего момента в настоящее время используются в различных отраслях машиностроения, таких как авиа и судостроение, производство буровых установок и приборостроение. Соединения с равноосным контуром (РК-профильные соединения) применяются наиболее широко [18, 36, 110, 111, 112].

РК-профильные соединения представляют собой альтернативу шлицевым и шпоночным соединениям для передачи крутящего момента между деталями машин, исполнительных механизмов и различных инструментов. Крутящий момент в таких соединениях передается по гладким криволинейным поверхностям, что для узлов с осевым перемещением сопрягаемых деталей ввиду возникающих распорных усилий, может привести к нежелательному заклиниванию деталей [113, 114]. Проблема заклинивания решается качественной обработкой поверхностей сопрягаемых деталей и применение смазочных материалов.

Кроме указанных недостатков данные соединения имеют также ряд преимуществ – более высокая долговечность, меньший уровень шума при работе, меньшая металлоемкость при равных параметрах передачи, более высокий

КПД по сравнению со типовыми соединениями. РК-профильные соединения выполняются с гарантированным зазором или натягом, с переходными посадками. Они могут быть цилиндрические и конусообразные [18, 33, 36, 66, 93, 94, 101, 115, 116, 121].

Схематично геометрические параметры РК-профильной поверхности представлены на рис.1, где  $D$  – диаметр описанной окружности;  $d$  – диаметр вписанной окружности;  $R$  – радиус средней окружности);  $\theta$  – угловой параметр;  $e$  – эксцентриситет профиля;  $N$  – количество граней.

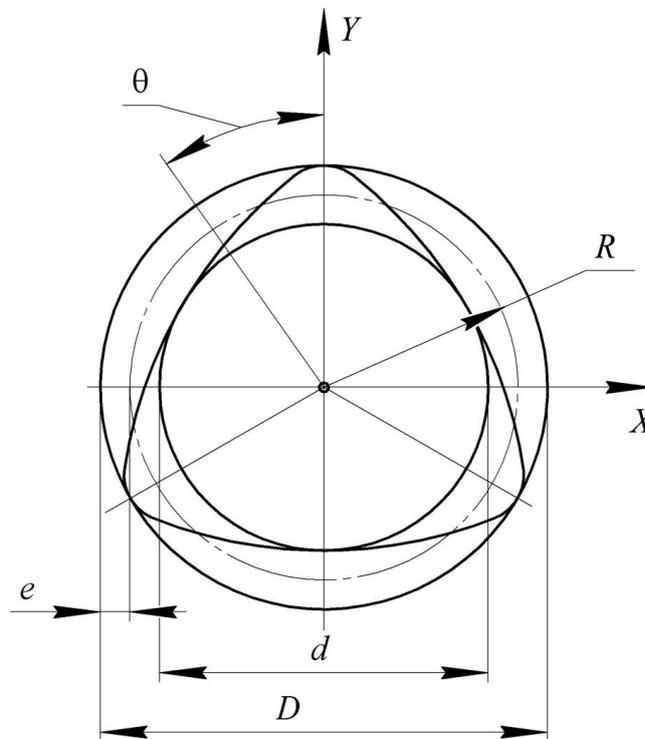


Рис. 1.1 Геометрические параметры РК-профильной поверхности

Уравнение РК-профильной поверхности можно представить в виде вектора:

$$\vec{r}_0(\theta, z) = \begin{pmatrix} [R - e \cdot \cos(N \cdot \theta)] \cdot \cos \theta - N \cdot e \cdot \sin(N \cdot \theta) \cdot \sin \theta \\ [R - e \cdot \sin(N \cdot \theta)] \cdot \sin \theta - N \cdot e \cdot \sin(N \cdot \theta) \cdot \cos \theta \\ z \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (1.1)$$

Примером широкого использования РК-профильных соединений можно считать соединение шкивов с валом в металлорежущих станках фирмы

SCHAUBLIN и другого оборудования преимущественно немецкого производства.

Внедрение РК-профильных валов в отечественном машиностроении ограничено в основном технологическими ограничениями существующих производств, недостаточной технологичностью и отсутствием необходимого для их производства технологического оборудования и инструментального обеспечения [18, 33, 36, 66, 94, 101, 120].

## **1.2. Анализ существующих методов изготовления наружных РК-профильных поверхностей**

Изучение известных современных и перспективных методов обработки РК-профильных поверхностей показал, что их можно разделить на несколько групп:

- методы обработки, характеризуемые наличием различных возвратно-поступательных перемещений и/или гармонических колебаний;
- формообразования профиля методом копирования с наличием делительного движения заготовки;
- формообразования профиля методом огибания;
- способы формирования РК профиля с подачей, обеспечиваемой конструкцией самого инструмента при взаимосвязанном движении.

К методам обработки, основанным на возвратно-поступательных перемещениях или гармонических колебаниях, можно отнести следующие:

- метод обработки РК-профильных ступеней на профилешлифовальных станках после предварительной обработки резанием, реализуемый сочетанием двух возвратно-поступательных перемещений режущего инструмента, что требует значительной модернизации оборудования [36, 82];
- метод копирования, выполняемый на гидрокопировальном станке с настройкой станка путём применения новых копиров по каждый типоразмер

РК-профиля с соответствующими размерами сечений, что значительно снижает производительность обработки [18, 36];

– способ формообразования РК-профильных поверхностей, предложенный Р. Мюселем, основан на сочетании двух прямолинейных, поступательных гармонических перемещениях относительно вертикальной и горизонтальной осей координат с частотой, превышающей частоту вращения обрабатываемой заготовки в  $N$  раз, обеспечиваемых механизмами-построителями оборудования. [18, 33, 36, 56, 105, 106, 117].

Гармонические колебания, снижают точность обрабатываемой поверхности и производительность и являются серьезным сдерживающим фактором для широкого применения указанного метода обработки.

Борович Л. С. предложил процесс формообразования РК-профильных поверхностей, представляющий собой синтез двух поступательных перемещений инструмента по траектории окружности с рассчитанным радиусом. [13, 14, 18, 36]. Способ обработки обладает определенными преимуществами, но не обеспечивает требуемой точности формы.

Известен метод фрезерования валов с равноосным контуром специальными торцевыми фрезами на обычных станках горизонтальной компоновки предложенный Чемборисовым Н. А., реализуемый на многоцелевых, горизонтально-фрезерных и расточных станках с применением специального приспособления, сложность изготовления которого и является недостатком данного метода [100].

Профессор Тимченко А. И. выполнил систематизацию сведений по РК- и К-профилям и предложил различные способы формообразования РК-профильных поверхностей. В соавторстве с Гулмутдиновым Р. Г. был разработан метод, в котором формообразование происходит за счет сочетания поступательных движений: по горизонтальной координате и перемещения по траектории окружности. Суть способа заключается в перемещении каретки вдоль оси ОХ, с осуществлением одновременного возвратно-поступательного движения и прямолинейного гармонического перемещения [1, 18, 36, 56, 93, 95].

Еще один предложенный Тимченко А. И. способ обработки представляет собой процесс формообразования РК-профильных поверхностей реализуемый поступательным движением инструмента по траектории окружности и поступательного движения вдоль оси ОУ [85, 94]. Им же был предложен способ обработки РК-профильных валов с помощью одного поступательного перемещения формообразующей плоскости вдоль оси ОХ по гармоническому закону [2, 3, 4, 5, 18, 56, 93].

Данные способы формообразования проработаны на высоком техническом уровне. К недостаткам можно отнести наличие гармонических перемещений, требующих разработки и применения специальных приспособлений или оборудования. Следует учесть, что гармонические колебания влияют на точность обрабатываемой поверхности, внося дополнительную погрешность в виде отклонения от заданной формы поверхности.

Ковтуном Д.А разработан процесс формообразования РК-профильных отверстий, основанного на одном формообразующем движении по окружности с заданным радиусом в плоскости, расположенной под углом к оси обрабатываемой заготовки [18, 36]. Данный способ обработки для валов с равноосным контуром представляет собой сложную комбинацию движений элементов приспособления и станка, что влияет на производительность обработки.

Вышеуказанные способы обработки РК-профильных поверхностей предполагает применение различных видов гармонических колебаний инструмента и (или) детали, что снижает достижимую точность обработки и производительность. Способы обработки предполагают использование оборудования и (или) оснастки сложной конструкции и соответственно повышения затрат, что влияет на себестоимость обработки РК-профильных поверхностей.

Дальнейшие разработки способов обработки РК-профильных поверхностей в основном были направлены на исключение гармонических перемещений.

Волковским С.В. предложен способ формообразования равноосного профиля суть которого в обработке цельной и сборной червячной фрезой детали по методу огибания [18].

Шитиковым А. Н. предложено использовать для обработки сборную фасонную фрезу, которая обрабатывает одну сторону РК-профиля заготовки за проход, после чего заготовку поворачивают делительным механизмом относительно оси на заданный угол для обработки следующей стороны профиля.

К недостаткам данного способа можно отнести относительную сложность проектирования и изготовления инструмента, вероятность подрезания смежных ступеней вала и невозможность обработки коротких участков и шеек валов с равноосным контуром [101].

Понкратовым П. А. предложен способ формообразования РК-профильных валов и отверстий с применением специальных инструментов – долбяков, работающих по методу обката, имеющих специальный профиль режущей кромки [80]. Недостатки метода в том, что долблением можно обрабатывать лишь ограниченные по размерам и расположению ступени РК-профиля, также проектирование и изготовления таких инструментов представляет собой сложный процесс.

Известен также метод протягивания РК-профильных ступеней валов. Данный метод по сравнению с вышеуказанными следует признать заметно более производительным. Внедрение данного метода требует оснащение протяжных станков специальной оснасткой. Подобным образом в МГТУ «Станкин» был разработано и оснащено специализированное оборудование для протягивания РК-профильных валов. Способ обработки отличается тем, что обрабатываемый вал равномерно вращается вокруг собственной оси и гармонически перемещается вдоль оси  $Y$  относительно плоской протяжки [36, 98]. К недостаткам способа можно отнести необходимость использования сложного специального приспособления, гармонические перемещения влияют на точность обрабатываемых поверхностей.

Способ обработки РК-профильных ступеней, предложенный Мальневой Ю. А. дисковыми фрезами с конструктивной радиальной подачей с синхронным вращением обрабатываемого вала и инструмента обладает высокой производительностью и позволяет получить обработанную поверхность высокого качества [66, 68, 69, 70, 73]. К недостаткам данного способа можно отнести значительные габариты дисковой фрезы и ограниченный шириной фрезы размер обрабатываемой поверхности по оси детали.

В заключении, на основе проведенного анализа способов обработки можно сделать вывод, что в настоящее время отсутствует принципиально новый производительный способ обработки РК-профильных ступеней валов применимый в крупносерийном и массовом производстве.

### **1.3. Описание способа формообразования фрезерованием с продольной подачей и синтез производящей поверхности фрезы**

Для повышения производительности обработки валов с равноосным контуром [44, 48] был предложен способ формообразования валов с РК-профильными ступенями фрезой-протяжкой с осевой подачей (рис. 1.2), где  $R$  – радиус детали;  $R_f$  – радиус фрезы;  $n_v$  – частота вращения детали;  $n_f$  – частота вращения фрезы-протяжки;  $S_f$  – осевая подача инструмента;  $t_s$  – координата осевого положения инструмента;  $X_l, Y_l$  – координаты детали в системе координат станка;  $X_f, Y_f$  – координаты фрезы-протяжки в системе координат станка;  $X_0, Y_0$  – относительные координаты детали;  $X_f, Y_f$  – относительные координаты фрезы-протяжки;  $\theta_1, \theta_2$  – параметрические углы поворота детали и фрезы-протяжки [72].

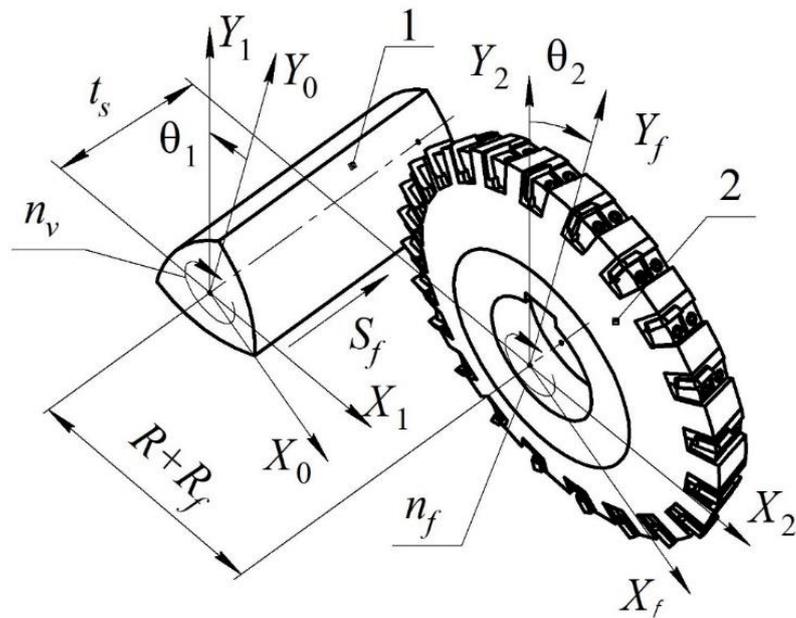


Рис. 1.2 Схема обработки валов с равноосным контуром фрезой-протяжкой с переменным радиусом и поперечной подачей:  
 1-обрабатываемая деталь; 2-фреза-протяжка

Данный способ обеспечивает обработку ступени валов с равноосным контуром без использования специальных приспособлений и гармонических перемещений заготовки или детали, что в итоге позволит повысить производительность обработки, что особенно важно при крупносерийном и массовом производстве.

Повышение производительности обработки может быть достигнуто за счет:

- применения простых движений – вращение детали и фрезы-протяжки на параллельных осях;
- отношение частоты вращения фрезы-протяжки к частоте вращения вала кратно количеству сторон РК-профиля, что повышает количество зубьев, обрабатывающих одну сторону профиля;
- производящая поверхность фрезы-протяжки для исключения возвратно-поступательного движения при обработке имеет переменный радиус, диапазон изменения которого равен двум эксцентриситетам обрабатываемого профиля вала.

Вопросы, связанные с созданием методики проектирования фрез, рассмотрены в трудах А. Н. Борисова [11], Д. Б. Белова [12], С. И. Брусова [15, 16], А. О. Гладышкина [19], А. А. Горохова [20], В. А. Гречишникова [21, 23], С. Г. Емельянова [24, 25], Ю. М. Ермакова [28], Д. А. Жихарева [29], М. В. Жуплова [31], С. Ю. Илюхина [34], В. В. Истоцкого [35], В. В. Куца [53, 54, 57, 58, 59], С. И. Лашнева [64], Мальневой Ю. А. [66, 67, 68, 69, 70], А. С. Тарапанова [77, 78, 92], О. В. Полохин [78, 79], В. Б. Протасьева [81], В. И. Сотникова [86], И. Н. Сухаркина [89], Г. А. Сухочева [91], М. В. Ушакова, [96], А. Н. Фролова [97], Г. Н. Харламова [98], С. А. Чевычелова [99], А. Н. Шитикова [101], М. В. Юликова [103], и других.

Проведенный анализ показал, что в настоящее время нет научно-исследовательских работ в области проектирования фрез-протяжек для обработки РК-профилей с осевой подачей, оснащенными СМП, вследствие чего не разработана методика проектирования подобного инструмента, что осложняет процесс внедрения данного способа обработки в современном производстве.

Ввиду высокой трудоемкости изготовления цельных двусторонних фрез-протяжек, а также дополнительных затрат времени на переточку и восстановление такого инструмента предложен вариант сборной фрезы-протяжки, оснащенной сменными многогранными пластинами (СМП)[44].

#### **1.4. Обоснование целесообразности применения фрезы-протяжки оснащенной СМП**

Основным критерием оценки эффективности обработки равноосных контуров в условиях крупносерийного и массового производства в первую очередь будет производительность обработки.

Выбор различных методов обработки, оборудования, приспособлений и инструментов также определяется заданными требованиями к обрабатываемой поверхности.

К основным технологическим операциям выше указанных способов обработки для изготовления валов с равноосным контуром можно отнести обработку точением и фрезерованием.

Обработка точением в настоящее время для обработки валов с длинными РК- профильными ступенями является предпочтительной. Основные достоинства данного метода: низкая стоимость применяемого инструмента и простота изготовления изделий, высокая производительность. К недостаткам можно отнести необходимость придания формообразующего движения инструменту.

В работах [8, 17] рассмотрены варианты замены токарной обработки поверхностей вращения фрезерованием. К ним относят как фрезерование цилиндрических ступеней крупных валов, так и фрезерование некруглых профилей ступеней валов, шеек коленчатых валов и т. д. Повышение производительности обработки при фрезеровании может быть достигнуто за счет значительного увеличения скорости резания, поскольку скорость резания складывается из скорости вращения обрабатываемого вала и встречного вращения инструмента.

В работах [29, 33, 88] была проведена сравнительная оценка производительности обработки точением и фрезерованием. Оценка производительности выполнялось по отношению основного времени точения проходным резцом к основному времени обработки фрезерованием и в результате были сделаны выводы, что производительность фрезерования выше в 3÷5 раз.

На основе вышесказанного можно сделать вывод о целесообразности замены процесса точения на фрезерование валов со ступенями, имеющими профиль равноосного контура.

Следует отметить, что выполнение операции обработки РК-профильной ступени на горизонтально-фрезерном станке с применением профилированного инструмента [101] по сравнению с применением фрезы-протяжки увеличивает трудоемкость на 45÷55% и соответственно снижает производительность обработки профильных валов.

Также известен метод фрезерования РК-профильных валов дисковой фрезой с конструктивной радиальной подачей [66], обработка которой ведется за один оборот. К недостаткам такой фрезы можно отнести значительные габариты и ограничение ширины обрабатываемой ступени шириной инструмента

Производительность обработки РК-профильных валов фрезерованием может быть заметно увеличена с использованием фрезы-протяжки оснащенной СМП и работающей с осевой подачей инструмента.

### **1.5. Определение критериев оценки работоспособности фрезы-протяжки оснащенной СМП**

Проведенное исследование существующих работ [17, 30, 32, 66, 71, 74, 75, 76, 87] показал, что построение методики проектирования инструмента для обработки сложно-профильных поверхностей основано на геометрическом и кинематическом описании процессов формообразования поверхностей технически сложных форм.

К наиболее важным критериям оценки работоспособности фрезы-протяжки в процессе формообразования поверхностей можно отнести:

– обеспечение точности поверхности, которая должна соответствовать предельному значению отклонению от заданной формы поверхности соответствующем определенному качеству точности (по ГОСТ 24643-81 для нормальной относительной геометрической точности), для этого необходимо вос-

пользоваться методом расчета геометрических параметров остаточных слоев [29, 81];

- обеспечение такого положения всех СМП фрезы-протяжки, при котором обеспечивается положительный задний угол в процессе съема припуска, причем его отклонения находятся в заданном интервале [19, 61];

- обеспечение снижения неравномерности периода стойкости СМП фрезы в процессе эксплуатации, что требует выравнивания объема снимаемого слоя [31, 43, 65, 69, 90];

- обеспечение снижения неравномерности силовых параметров резания [15, 16] для выравнивания воздействия сил на качество обработки.

При проектировании фрезы-протяжки оснащенной СМП за основные критерии ее работоспособности в условиях серийного и массового производства были выбраны параметр отклонения от заданной формы поверхности, характеризующийся высотой неровностей  $\Delta_i$ , соответствующие заданному качеству точности обработки вала.

На рисунке 1.3 представлены оценочный параметр  $\Delta_i$  фрезы-протяжки оснащенной СМП.

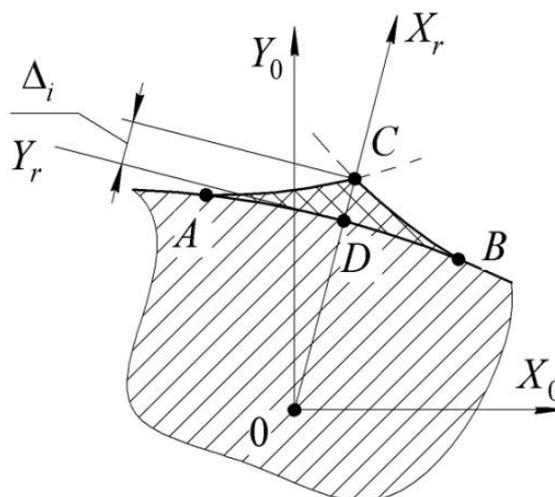


Рис. 1.3. Высота неровностей  $\Delta_i$  фрезы-протяжки с переменным радиусом [69]

В качестве второго основного оценочного параметра принимаем равномерность периодов стойкости СМП фрезы-протяжки.

## 1.6. Выводы

1. Исследованы области применения РК-профильных соединений и их геометрические параметры.

2. Проведенный анализ известных методов получения РК-профильных валов показал, что их применение в условиях серийного и массового производства ограничено вследствие высокой стоимости оборудования, оснастки и инструмента и зачастую невысокой точности обрабатываемой поверхности.

3. Предложен новый способ обработки валов с равноосным контуром фрезой-протяжкой оснащенной пластинами СМП, позволяющий обрабатывать ступени валов с равноосным контуром с осевой подачей инструмента, без применения сложных специальных приспособлений для создания гармонических колебаний.

4. Анализ и сравнение нового способа обработки ступеней валов с равноосным контуром с имеющимися способами позволил установить, что применение фрезы-протяжки оснащенной СМП и работающей с осевой подачей позволит снять существующие технологические ограничения и повысить производительность обработки.

5. Определены основные критерии работоспособности фрезы-протяжки оснащенной СМП, а именно критерий обеспечения допуска отклонения от заданной формы поверхности, снижения неравномерности периода стойкости СМП, и снижения неравномерности силовых параметров резания.

## Глава 2. Построение математической модели сборной фрезы-протяжки для обработки РК-профильных ступеней валов

### 2.1 Построение уравнения производящей поверхности фрезы-протяжки для обработки РК- профильных ступеней валов

В процессе проектирования фрезы-протяжки оснащенной СМП важным этапом является моделирование производящей поверхности на основе геометрической теории формирования поверхности режущими инструментами [37, 53, 64, 124]. При построении профиля производящей поверхности применим матрицы, моделирующие движение относительно оси (см. приложение 1):

$$\vec{r}_f(\theta, \theta_1, \theta_2) = [ {}^6A(\theta_1) {}^1A(R + R_f) {}^6A(\theta_2) ]^T \vec{r}_0(\theta). \quad (2.1)$$

Для выражения кривой производящей поверхности через параметр  $\theta_2$  следует провести преобразования, связанные с приведением формулы к одному параметру:

$$\theta_1 = \frac{\theta_2}{-N}. \quad (2.2)$$

Для вычисления функции  $\vec{r}_f(\theta, \theta_2)$  используем матрицу частных производных этой функций по всем переменным:

$$B = \begin{bmatrix} \vec{i} \frac{\partial \vec{r}_f(\theta, \theta_2)}{\partial \theta} & \vec{j} \frac{\partial \vec{r}_f(\theta, \theta_2)}{\partial \theta} \\ \vec{i} \frac{\partial \vec{r}_f(\theta, \theta_2)}{\partial \theta_2} & \vec{j} \frac{\partial \vec{r}_f(\theta, \theta_2)}{\partial \theta_2} \end{bmatrix}. \quad (2.3)$$

Для решения функции рассчитаем определитель данной матрицы:

$$\det|B| = 0. \quad (2.4)$$

Решением данного уравнения будет функция:

$$\theta_2(\theta) = \arctg \left( \frac{C\theta_2(\theta)}{S\theta_2(\theta)} \right). \quad (2.5)$$

Ввиду высокой трудоемкости расчета составляющие этой функции определяем в программном продукте Maple 2020 [84]. Учитывая, что числитель и знаменатель представляет собой функции с разделенными точками разрыва участками:  $A: 0 \leq \theta < \pi/3$ , и  $B: \pi/3 \leq \theta < 2/3\pi$ , выразить их можно следующим образом:

$$\begin{aligned}
C\theta_2(\theta)_A &= -\frac{1}{(R + R_s) \cos \theta} \left( (N - 1) \sin(N\theta) \cos(N\theta)^2 e \right. \\
&\quad + (\cos^2 \theta (N^2 \cos(N\theta)^2 e^2 - 2N \cos(N\theta)^2 e^2 - N^2 e^2 \\
&\quad \left. + \cos(N\theta)^2 e^2 + 2Ne^2 + R^2 - e^2) \right)^{1/2} \sin \theta; \\
C\theta_2(\theta)_B &= -\frac{1}{(R + R_s) \cos \theta} \left( N \sin(N\theta) \cos^2 \theta e - \sin(N\theta) \cos^2 \theta e \right. \\
&\quad - \cos^2 \theta (N^2 \cos(N\theta)^2 e^2 - 2N \cos(N\theta)^2 e^2 - N^2 e^2 + \cos(N\theta)^2 e^2 \\
&\quad \left. + 2Ne^2 + R^2 + 2RR_f + R_f^2 - e^2) \right)^{1/2} N; \\
S\theta_2(\theta)_A &= -\frac{1}{R + R_f} \left( Ne \sin(N\theta) \sin \theta - e \sin \theta \sin N\theta \right. \\
&\quad - \left( \cos^2 \theta (N^2 \cos(N\theta)^2 e^2 - 2N \cos(N\theta)^2 e^2 - N^2 e^2 + \cos(N\theta)^2 e^2 \right. \\
&\quad \left. \left. + 2Ne^2 + R^2 + 2RR_f + R_f^2 - e^2) \right)^{1/2} \right) N; \\
S\theta_2(\theta)_B &= -\frac{1}{R + R_f} \left( Ne \sin(N\theta) \sin \theta - e \sin \theta \sin N\theta \right. \\
&\quad + \left( \cos^2 \theta (N^2 \cos(N\theta)^2 e^2 - 2N \cos(N\theta)^2 e^2 - N^2 e^2 + \cos(N\theta)^2 e^2 \right. \\
&\quad \left. \left. + 2Ne^2 + R^2 + 2RR_f + R_f^2 - e^2) \right)^{1/2} \right) N.
\end{aligned} \tag{2.6}$$

На основе полученных зависимостей получаем следующее выражение:

$$\begin{aligned}
\vec{r}_f(\theta, h) = & \left[ (-R - R_f) \cos(\theta_2(\theta)) + \right. \\
& + \left( -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}N \right) e \cos \left( \frac{N\theta + \theta - N\theta_2(\theta) + \theta_2(\theta)}{N} \right) + \\
& + \left( -\frac{1}{2}N - \frac{1}{2} \right) e \cos \left( \frac{N\theta - \theta + N\theta_2(\theta) - \theta_2(\theta)}{N} \right) + \\
& + R \cos \left( \frac{\theta - N\theta_2(\theta) + \theta_2(\theta)}{N} \right), (R + R_f) \sin \theta_2(\theta) + \\
& + \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2}N \right) e \sin \left( \frac{N\theta - \theta + N\theta_2(\theta) - \theta_2(\theta)}{N} \right) \\
& + \left( -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}N \right) e \sin \left( \frac{N\theta + \theta - N\theta_2(\theta) + \theta_2(\theta)}{N} \right) + \\
& \left. + R \sin \left( \frac{\theta - N\theta_2(\theta) + \theta_2(\theta)}{N} \right), h, 1 \right]^T.
\end{aligned} \tag{2.7}$$

На основе полученного выражения, после проведения преобразований формула производящей поверхности инструмента [53, 60, 61,] будет иметь вид:

$$\begin{aligned}
\vec{r}_f(\theta, h) = & \left[ e \cdot \sin \theta \left( -4N \cos \left( \frac{\theta}{N} \right)^2 + N \right) \cdot \sin \left( \frac{\theta}{N} \right) \right. \\
& - 4(e \cdot \cos \theta + R) \cos \left( \frac{\theta}{N} \right)^3 + \\
& + 3(e \cdot \cos \theta + R) \cos \left( \frac{\theta}{N} \right), \left( -4(e \cdot \cos \theta + R) \cos \left( \frac{\theta}{N} \right)^2 \right. \\
& \left. \left. + e \cdot \cos \theta + R \right) \right. \\
& \cdot \sin \left( \frac{\theta}{N} \right) + 4N \sin \theta \cdot \cos \left( \frac{\theta}{N} \right)^3 e - 3Ne \cdot \sin \theta \\
& \left. \cdot \cos \left( \frac{\theta}{N} \right), h, 1 \right]^T.
\end{aligned} \tag{2.8}$$

Полученная формула обеспечивает формообразование РК – профиля за N оборотов инструмента.

На рисунке 2.1 изображена математическая модель производящей поверхности фрезы:

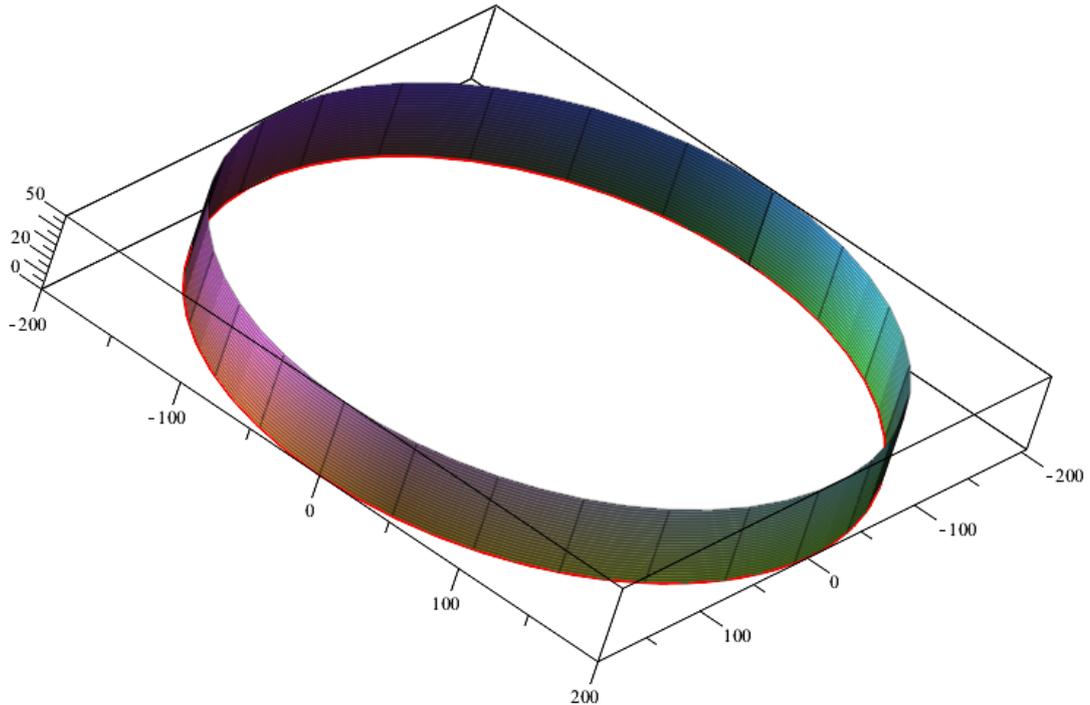


Рис. 2.1 Модель производящей поверхности фрезы

Задача проектирования фрезы-протяжки, оснащенной сменными многогранными пластинами, требует моделирования положения режущих кромок и моделирования схемы установки СМП в корпусе фрезы-протяжки.

## **2.2 Моделирование режущих кромок сменных многогранных пластин**

Методы проектирования сборных фрез оснащенных СМП в настоящее время в основном сводятся к созданию моделей и алгоритмов, описывающих процесс фрезерования и конструкцию фрезы [41]. Геометрические параметры и размеры фрез определяются в основном конструкторскими решениями. Основным оценочным критерием качества проектирования инструмента является величина погрешности аппроксимации обрабатываемого профиля режущими

кромками сменных многогранных пластин (СМП) – иначе говоря, отклонения реальной поверхности от теоретического профиля [59].

Построение эффективных методов расчета оценочных параметров осуществляется на основе математического описания геометрии режущих кромок СМП, расположения ее передней и задней поверхности [4, 5, 7, 10]. Для расчетов необходимо определить следующие параметры:

- координаты опорных точек в собственной системе координат,
- длину дуги профиля режущей кромки,
- векторы нормали к передней и задней поверхности.

Выполним аналитическое описание режущих кромок СМП набором векторных функций:

$$\vec{r}_k(S_k), \vec{N}_k(S_k), \vec{T}_k(S_k), \quad (2.9)$$

где  $\vec{r}_k(S_k)$  – функция радиус-вектора режущей кромки  $k$ -й СМП;

$S_k$  – параметр длины режущей кромки  $S_k = 0 \dots S_{k \max}$ ;

$\vec{N}_k(S_k)$  – функция вектора нормали к передней поверхности  $k$ -й СМП;

$\vec{T}_k(S_k)$  – функция вектора нормали к задней поверхности  $k$ -й СМП.

После анализа конструкций пластин, в качестве СМП для проектируемой фрезы-протяжки выбрана пластина SECN-1203EEL ГОСТ 27302–87, рекомендуемые для применения в дисковых фрезах с возможностью осевой подачи (см. рис. 2.2).

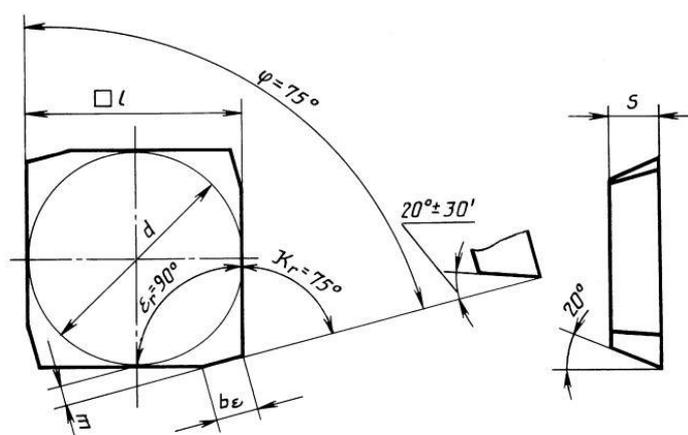


Рис. 2.2 Режущая пластина SECN-1203EEL ГОСТ 27302–87

Для прототипа фрезы-протяжки для проведения эксперимента в качестве режущих элементов выбраны резцы с квадратной пластиной типа SCMT09T304 (рис. 2.3).

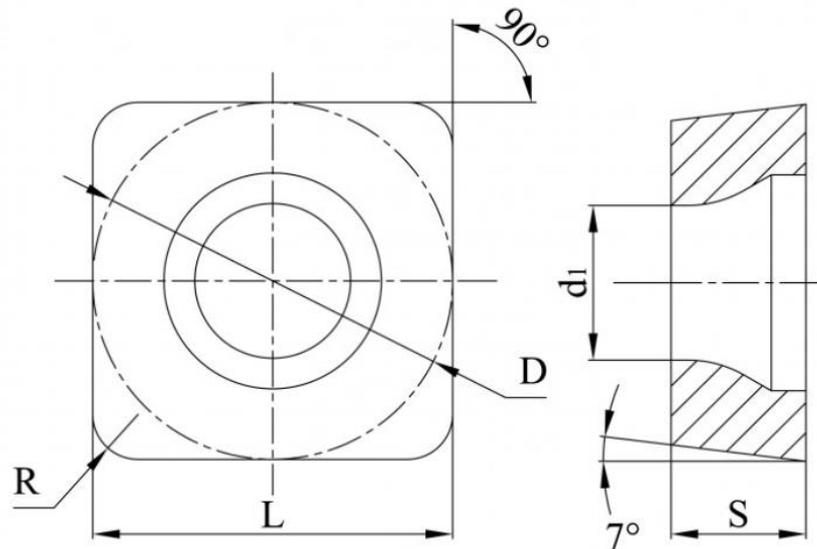


Рис. 2.3 Режущая пластина SCMT09T304 прототипа фрезы-протяжки

Следующие этапы расчета параметров конструкции сборной фрезы со СМП для обработки РК – профиля предполагает решение следующих задач:

- построение уравнения режущих кромок выбранной СМП;
- расчет положения и ориентации пластин СМП относительно системы координат производящей поверхности фрезы;
- построение модели движения формообразования в соответствии со схемой обработки (рис.1.2);
- построение модели поверхности резания, образуемой движением режущих кромок фрезы в процессе фрезерования.

Для пластины квадратной с фасками при вершине без отверстия (по ГОСТ 27302–87) координаты опорных точек профиля (точки 1–4) рассчитаем следующим образом (рис. 2.3) [6, 42, 58]:

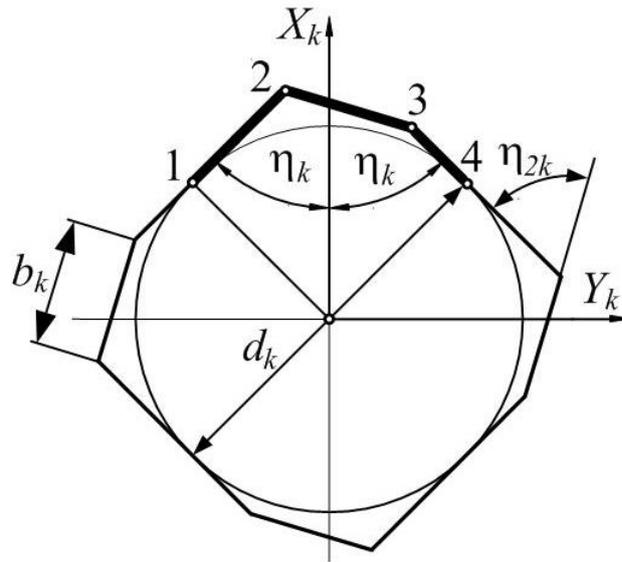


Рис. 2.4 Схема расчета опорных точек профиля квадратной СМП с фасками при вершине [6, 58]

Координаты точки 1:

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{d_k}{2} \sin(\eta_k); \\ y_1 &= -\frac{d_k}{2} \cos(\eta_k). \end{aligned} \quad 2.10$$

Координаты точки 2:

$$\begin{aligned} x_2 &= a \cdot \cos(\eta_k - \arccos(d_k/2a)); \\ y_2 &= -a \cdot \sin(\eta_k - \arccos(d_k/2a)), \end{aligned} \quad 2.11$$

где

$$a = \sqrt{(d_k/2)^2 + (d_k/2 - b_k \cos(\eta_{2k}))^2}.$$

Координаты точки 3:

$$\begin{aligned} x_3 &= b \cdot \cos(\eta_k - \arccos(d_k/2b)); \\ y_3 &= b \cdot \sin(\eta_k - \arccos(d_k/2b)), \end{aligned} \quad (2.12)$$

где

$$b = \sqrt{(d_k/2)^2 + (d_k/2 - b_k \sin(\eta_{2k}))^2}.$$

Координаты точки 4:

$$\begin{aligned} x_4 &= x_1; \\ y_4 &= -y_1. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Функции координат радиус-вектора типового участка профиля (точки 1–4) режущей кромки  $k$ -й СМП запишем, как:

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ (s_{ki} - s_2)(y_3 - y_2)/(s_3 - s_2) + y_2, & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ y_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases} \quad (2.14)$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_2 + (x_3 - x_2)(y_{ki}(s_{ki}) - y_2)/(y_3 - y_2), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4, & s_{ki} > s_4, \end{cases} \quad (2.15)$$

где

$$\begin{aligned} s_2 &= \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}; \\ s_3 &= s_2 + \sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_3 - y_2)^2}; \\ s_4 &= s_3 + \sqrt{(x_4 - x_3)^2 + (y_4 - y_3)^2}. \end{aligned} \quad (2.16)$$

Для квадратной пластины фрезы-протяжки применим расчет для равно-сторонних и равноугольных пластин с радиусом при вершинах.

Исходными данными для выполнения расчета примем (рис. 2.5):

$N_k$  – количество типовых участков режущей кромки (число сторон пластины).

$d_k$  – диаметр вписанной окружности.

$r_{pk}$  – радиус при вершине.

$S_{pk}$  – толщина пластины.

$\alpha_k, \gamma_k$  – задний и передний угол пластины.

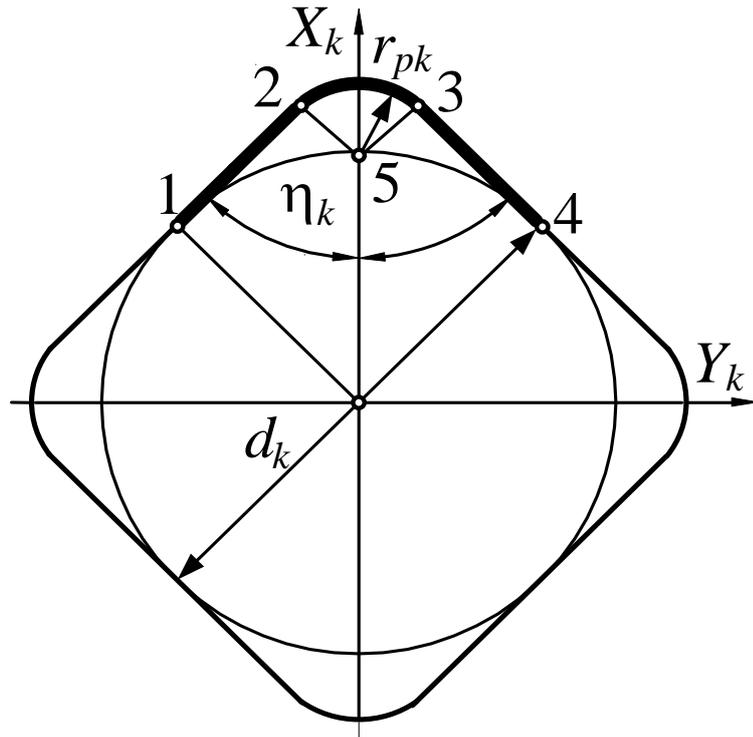


Рис. 2.5 Схема расчета опорных точек профиля равносторонних и равноугольных пластин с радиусом при вершине [6, 58]

На основе этих параметров выполним расчет опорных точек участка профиля (точки 1–5).

Координаты точки 1 рассчитываются аналогично предыдущему варианту (2.10):

Координаты точки 2

$$x_2 = \frac{d_k/2 - r_{pk} \cos^2(\eta_k)}{\sin(\eta_k)}; \quad 2.17$$

$$y_2 = -r_{pk} \cos(\eta_k).$$

Координаты точки 3

$$x_3 = x_2; \quad 2.18$$

$$y_3 = -y_2.$$

Координаты точки 5

$$x_5 = (d_k/2 - r_{pk}) \sin^{-1}(\eta_k); \quad 2.19$$

$$y_5 = 0.$$

Функции координат радиус-вектора типового участка профиля (точки 1–4) режущей кромки  $k$ -й СМП

$$\bar{r}_{ki}(s_{ki}) = [x_{ki}(s_{ki}), y_{ki}(s_{ki}), z_{ki}(s_{ki}), 1]^T, \quad 2.20$$

представим, как

$$y_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} y_1, & s_{ki} \leq 0; \\ s_{ki}(y_2 - y_1)/s_2 + y_1, & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ -r_{pk} \sin(\pi/2 - \eta_k - (s_{ki} - s_2)/r_{pk}), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ (s_{ki} - s_3)(y_4 - y_3)/(s_4 - s_3) + y_3, & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ y_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases} \quad 2.21$$

$$x_{ki}(s_{ki}) = \begin{cases} x_1, & s_{ki} \leq 0; \\ x_1 + (x_2 - x_1)(y_{ki}(s_{ki}) - y_1)/(y_2 - y_1), & 0 < s_{ki} \leq s_2; \\ x_5 + r_{pk} \cos(\pi/2 - \eta_k - (s_{ki} - s_2)/r_{pk}), & s_2 < s_{ki} \leq s_3; \\ x_3 + (x_4 - x_3)(y_{ki}(s_{ki}) - y_3)/(y_4 - y_3), & s_3 < s_{ki} \leq s_4; \\ x_4, & s_{ki} > s_4; \end{cases}$$

$$z_{ki}(s_k) = -S_{pk};$$

где  $s_2, s_3, s_4$  – длина профиля режущей кромки в соответственно в точках 2, 3 и 4

$$s_2 = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2};$$

$$s_3 = s_2 + (\pi - 2\eta_k)r_{pk};$$

$$s_4 = s_2 + s_3.$$

Тогда, функцию радиус-вектора всей режущей кромки  $k$ -й СМП запишем, как

$$\bar{r}_k(s_k) = {}^6A \left( \frac{2\pi}{N_k} \left\lfloor \frac{s_k}{s_{ki_{max}}} \right\rfloor \right) \cdot \bar{r}_{ki} \left( s_k - \left\lfloor \frac{s_k}{s_{ki_{max}}} \right\rfloor \cdot s_{ki_{max}} \right), \quad 2.22$$

где  $s_{ki_{max}} = s_4$ .

Вектор нормали к передней поверхности типового участка профиля (точки 1–4) режущей кромки  $k$ -й СМП рассчитаем, как

$$\bar{N}_{ki}(s_{ki}) = \begin{pmatrix} -\bar{j}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\sin(\gamma_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \\ \bar{i}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\sin(\gamma_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \\ -\cos(\gamma_k), \\ 0 \end{pmatrix}, \quad 2.23$$

а вектор нормали всей режущей кромки  $k$ -й СМП

$$\bar{N}_k(s_k) = {}^6A \left( \frac{2\pi}{N_k} \left\lfloor \frac{s_k}{s_{ki_{max}}} \right\rfloor \right) \cdot \bar{N}_{ki} \left( s_k - \left\lfloor \frac{s_k}{s_{ki_{max}}} \right\rfloor s_{ki_{max}} \right). \quad 2.24$$

Вектор нормали к задней поверхности типового участка профиля (точки 1–4) режущей кромки  $k$ -й СМП рассчитаем, как

$$\bar{T}_{ki}(s_{ki}) = \begin{pmatrix} \bar{j}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\cos(\alpha_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \\ -\bar{i}_k \cdot \frac{\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})}{\partial s_{ki}} \frac{\cos(\alpha_k)}{|\partial \bar{r}_{ki}(s_{ki})/\partial s_{ki}|}, \\ \sin(\alpha_k), \\ 0 \end{pmatrix}, \quad 2.25$$

а вектор нормали всей режущей кромки  $k$ -й СМП

$$\bar{T}_k(s_k) = {}^6A \left( \frac{2\pi}{N_k} \left\lfloor \frac{s_k}{s_{ki_{max}}} \right\rfloor \right) \cdot \bar{T}_{ki} \left( s_k - \left\lfloor \frac{s_k}{s_{ki_{max}}} \right\rfloor s_{ki_{max}} \right). \quad 2.26$$

Используя возможности системы Maple применяя данные функции, выполняем моделирование и геометрическое представление режущих кромок рассматриваемых СМП. На рисунке 2.6 представлено в геометрической форме результатов математического моделирования режущих кромок СМП квадратной с фасками при вершине. На рисунке 2.7 представлены результаты математического моделирования режущих кромок СМП с радиусом при вершине для прототипа фрезы-протяжки.

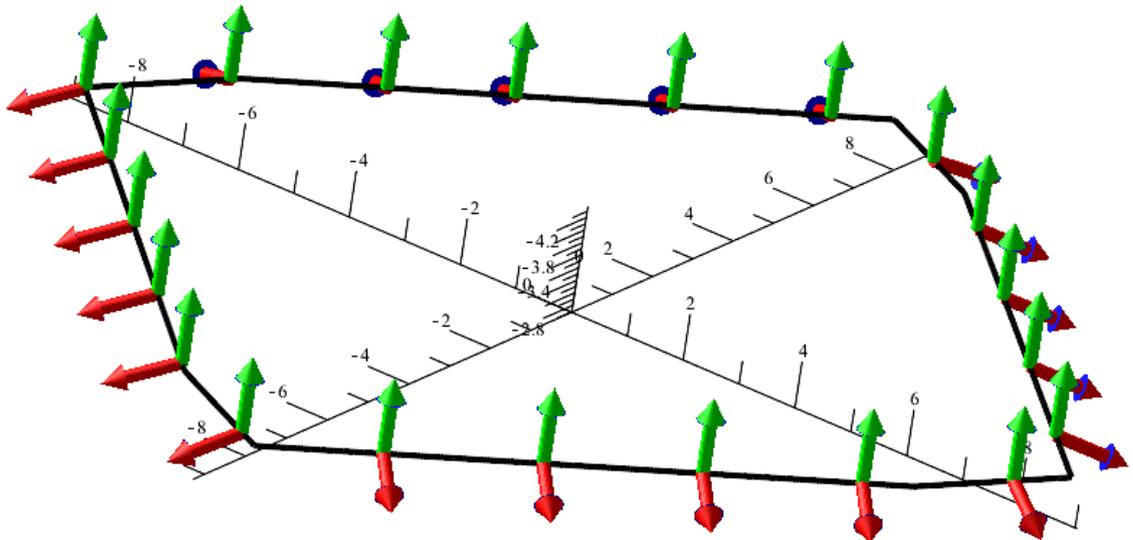


Рис. 2.6 Геометрическое представление результатов математического моделирования режущих кромок СМП квадратной с фасками при вершине.

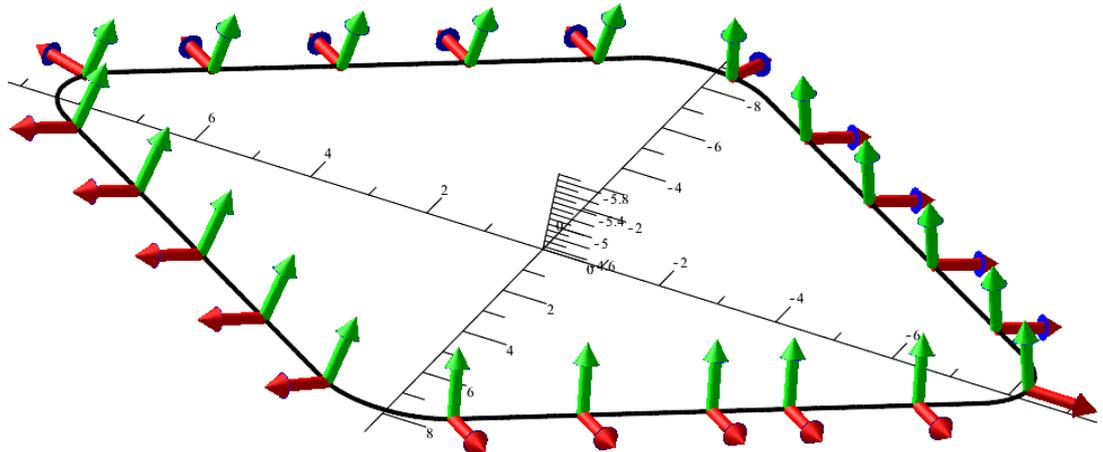


Рис. 2.7 Геометрическое представление результатов математического моделирования режущих кромок СМП квадратной с радиусом при вершине

Алгоритм расчета реализуем также для других типов СМП с различными формы режущими кромками. Моделирование режущих кромок различных пластин приведено в работе [59].

### 2.3 Моделирование схемы установки СМП в корпусе фрезы-протяжки

Процедура моделирования установки заключается в выборе вариантов схем установки СМП, при которых величина погрешности аппроксимации номинального профиля детали (или соответственно профиля производящей поверхности фрезы) не будет превышать заданного значения  $\Delta_{max}$ , определяемого требованиями к качеству обрабатываемой поверхности. При этом необходимо стремиться к минимальному количеству используемых СМП для снижения себестоимости инструмента [63].

Для определения положения и ориентации пластины СМП, удовлетворяющим условиям резания, необходимо рассчитать матрицу перехода в систему координат производящей поверхности.

$$A_{\Sigma_K} = {}^{01}A(\theta, z) \times {}^5A\left(-\frac{\pi}{2}\right) \times {}^4A\left(\frac{\pi}{2} - \lambda_K\right) \times {}^6A(\psi_K) \times {}^3A(Sp_K) \times \\ \times {}^1A(\Delta X_K) \times {}^2A(\Delta Y_K), \quad (2.27)$$

где  ${}^{01}A(\theta, z)$  – матрица перехода в систему координат точки производящей поверхности фрезы с параметрами  $\theta, z$ ;

${}^5A\left(-\frac{\pi}{2}\right)$  – матрица поворота пластины на угол  $-\frac{\pi}{2}$ ;

${}^4A\left(\frac{\pi}{2} - \lambda_K\right)$  – матрица поворота пластины для обеспечения угла наклона

главной режущей кромки  $\lambda_K$ ;

${}^6A(\psi_K)$  – матрица поворота пластины вокруг оси  $Z$  на угол  $\psi_K$ , при котором будет обеспечена величина требуемого угла в плане  $\varphi$ ;

${}^3A(Sp_K)$  – матрица перехода в систему координат основания СМП;

$Sp_K$  – толщина пластины СМП;

${}^1A(\Delta X_K) \cdot {}^2A(\Delta Y_K)$  – произведение матриц перехода координаты вершины пластины в системе координат СМП в систему координат производящей поверхности.

Данные параметры определяют положение текущей пластины в системе координат производящей поверхности.

В случае расположения СМП с равным угловым шагом  $\theta_k$ , его значение определяется следующим выражением:

$$\theta_k = \sum_{i=1}^{k-1} \frac{2\pi}{Z_f}, \quad (2.28)$$

где  $Z_f$  – количество СМП фрезы.

На рисунке 2.5 представлен результат построения модели инструмента с равномерно распределенными СМП и средним радиусом инструмента  $R_f = 200$  мм,  $Z_f = 25$ .

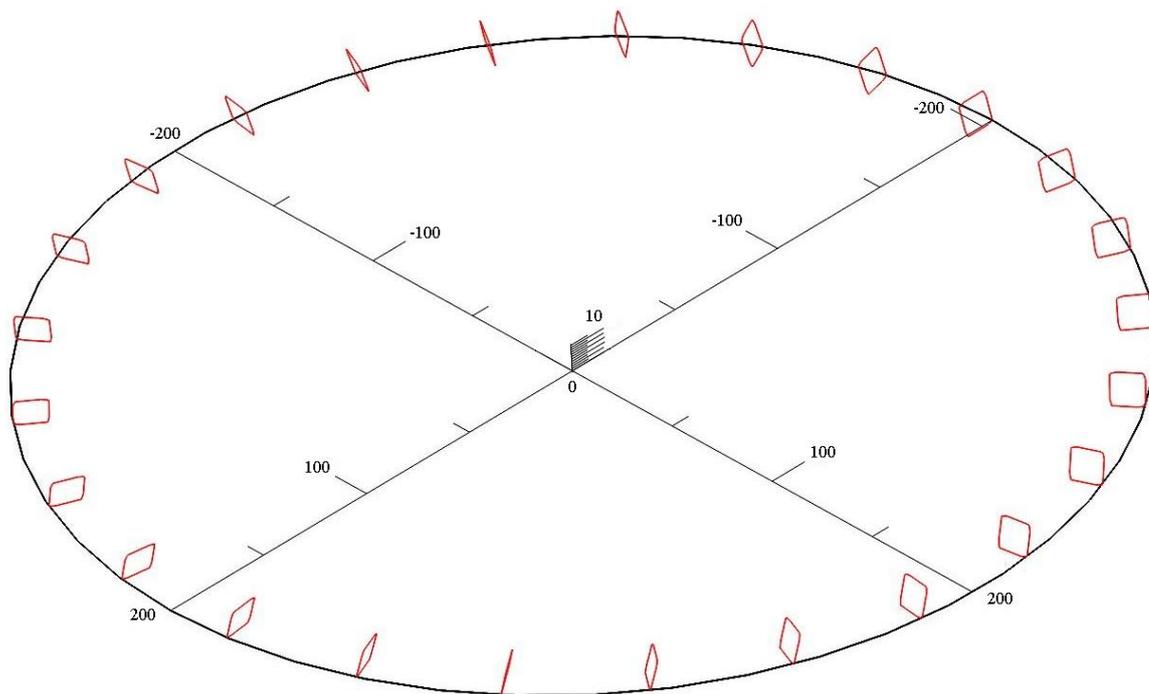


Рис. 2.5 Визуальное представление модели формообразующей поверхности с контурами режущих кромок СМП при  $Z_f = 25$ ,  $R_1 = 200$  мм

Определив положение режущих кромок относительно производящей поверхности. можно приступить к построению поверхности резания для каждой из режущих кромок.

#### 2.4 Построение уравнения поверхности резания, описываемой режущими кромками фрезы-протяжки в процессе работы

Для построения математической модели поверхности резания следует описать все взаимосвязанные рабочие движения детали и инструмента.

Матрица, описывающая движение инструмента в соответствии со схемой обработки описывается следующим выражением:

$$A_f(t) = {}^6A(n_v(t)) \cdot {}^1A(s_f(t)) \cdot {}^6A(n_f(t)), \quad (2.29)$$

где  $n_v(t)$  – параметр вращения вала:

$$n_v(t) = \frac{\pi \cdot n_v \cdot t}{30},$$

$n_v$  – частота вращения обрабатываемого вала;

$n_f(t)$  – параметр вращения фрезы:

$$n_f(t) = \frac{\pi \cdot n_v \cdot N \cdot t}{30},$$

$s_f(t)$  – параметр осевой подачи фрезы;

$$s_f(t) = \left( \frac{s_{мин} \cdot t}{60} \right),$$

$s_{мин}$  – минутная осевая подача фрезы.

Модель поверхности резания формируется в соответствии с выражением:

$$\vec{Q}_k(t, S_k) = A_f(t) \cdot A_{\Sigma k}(\theta_k, 0) \cdot \vec{r}_k(S_k), \quad (2.30)$$

где  $\vec{r}_k(S_k)$  – уравнение режущей кромки СМП в системе координат инструмента.

Визуальное представление поверхности резания отображено на рисунке 2.6.

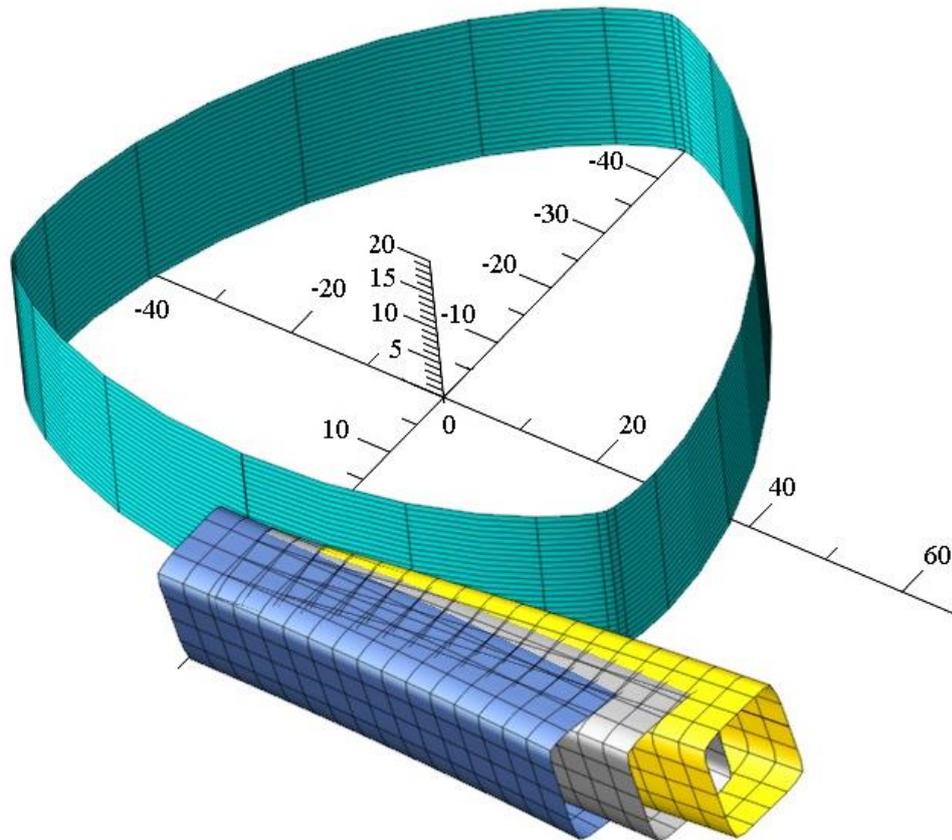


Рис. 2.6 Визуальное представление поверхности резания при обработке РК – профиля фрезой протяжкой

## 2.5 Выводы

1. Выполнено построение вектора движения фрезы-протяжки с осевой подачей и математическая модель производящей поверхности фрезы-протяжки.
2. Выполнено моделирование режущих кромок сменной многогранной пластины SECN-1203EEL ГОСТ 27302–87 и пластины SCMT09T304 для прототипа фрезы-протяжки
3. Выполнено моделирование схемы установки СМП в корпусе фрезы-протяжки при условии достижения требуемого качества обработки при минимальном количестве потребных СМП.
4. Выполнено построение уравнения поверхности резания, описываемой режущими кромками фрезы-протяжки в процессе обработки.

### Глава 3 Разработка методов расчета оценочных параметров процесса фрезепротягивания РК-профильных ступеней валов

#### 3.1 Разработка метода расчета погрешности формообразования поверхности РК – профиля при обработке сборной дисковой фрезой-протяжкой

Конструкция данной фрезы должна обеспечивать требуемую погрешность обработки, характеризуемую, в частности, величиной допуска погрешности формы обработанного вала в радиальном направлении ( $T\Delta_r$ ) [48].

Расчет данной величины может быть выполнен в соответствии со схемой (рис. 3.1) [26, 27, 64, 102].

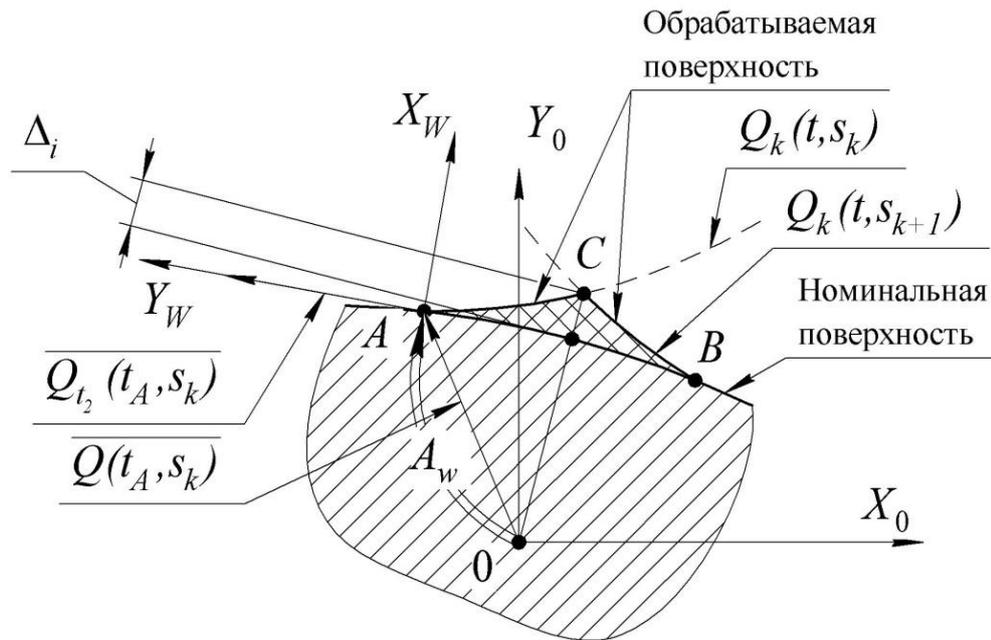


Рис. 3.1 Схема расчета геометрической формы гребешка [66]

1. Определим момент времени контакта точки режущей кромки  $k$ -й сменной многогранной пластиной (СМП) фрезы с деталью ( $t_A$ ) путем уравнения (точка  $A$ , см. рис. 3.1)

$$\frac{\vec{Q}_\theta(t_A, s_k) \cdot [\vec{Q}_t(t_A, s_k) \times \vec{k}_0]}{|\vec{Q}_\theta(t_A, s_k)| \cdot |\vec{Q}_t(t_A, s_k) \times \vec{k}_0|} = 0, \quad (3.1)$$

где  $\vec{Q}_\theta(t_A, s_k)$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k$ -й СМП по параметру профиля производящей поверхности фрезы;

$\vec{Q}_t(t_A, s_k)$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k$ -й СМП по параметру времени;

$\vec{k}_0$  – единичный орт, направление которого совпадает с положительным направлением оси  $Z_0$  системы координат детали;

$s_k$  – величина длины дуги режущей кромки СМП, определяющей точку контакта с производящей поверхностью фрезы.

2. Определим по методике, приведенной в [64] матрицу установки  $A_w$  системы координат секущей плоскости на основе векторов  $\vec{Q}(t_A, s_k), \vec{Q}_{t_2}(t_A, s_k), \vec{k}_0$ , где  $\vec{Q}_{t_2}(t_A, s_k)$  – производная поверхности резания по параметру вращения фрезы (главному движению) в точке поверхности с координатами  $t_A$  и  $s_k$ ;  $\vec{Q}(t_A, s_k)$  – радиус-вектор, определяющий точку на поверхности резания с координатами  $t_A$  и  $s_k$ .

3. Определим момент времени  $t_B$  контакта  $k+1$  СМП с обрабатываемой деталью путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} \frac{\vec{Q}_\theta(t_B, s_{k+1}) \cdot [\vec{Q}_t(t_B, s_{k+1}) \times \vec{k}_0]}{|\vec{Q}_\theta(t_B, s_{k+1})| \cdot |\vec{Q}_t(t_B, s_{k+1}) \times \vec{k}_0|} = 0; \\ \vec{k}_w \cdot \overrightarrow{A_w \cdot Q(t_B, s_{k+1})} = 0, \end{cases} \quad (3.2)$$

где  $\vec{Q}_\theta(t_B, s_{k+1})$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k+1$ -й СМП по параметру профиля производящей поверхности;

$\vec{Q}_t(t_B, s_{k+1})$  – производная поверхности резания образованной режущей кромкой  $k+1$ -й СМП по параметру времени;

$\vec{k}_w$  – единичный орт, направление, которого совпадает с положительным направлением оси  $Z_w$  системы координат секущей плоскости.

4. Определяем моменты времени  $t_C$  и  $t'_C$  когда режущая кромка  $k$ -й СМП и  $k+1$ -й СМП пересекаются в секущей плоскости  $W$ , путем решения системы уравнений относительно параметров  $t_C, s_{kC}, t'_C, s_{(k+1)C}$

$$\begin{cases} \vec{k}_W \cdot \overrightarrow{A_W \cdot Q(t_C, s_{kC})} = 0; \\ \vec{k}_W \cdot \overrightarrow{A_W \cdot Q(t'_C, s_{(k+1)C})} = 0; \\ \vec{i}_0 \cdot [\vec{Q}(t_C, s_{kC}) - \vec{Q}(t'_C, s_{(k+1)C})] = 0; \\ \vec{j}_0 \cdot [\vec{Q}(t_C, s_{kC}) - \vec{Q}(t'_C, s_{(k+1)C})] = 0. \end{cases} \quad (3.3)$$

5. Определим матрицу  $A_r$  установки радиальной секущей плоскости, проходящей через ось  $Z_0$  и точку  $C$  (см. рис. 3.2) на основе векторов:

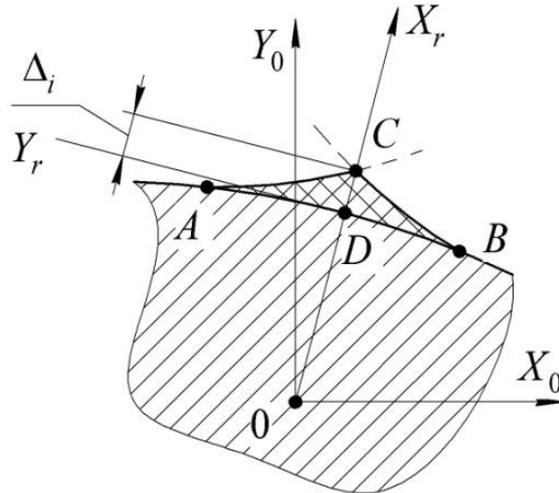


Рис. 3.2 Схема расчета высоты отклонения от номинального профиля в радиальном направлении [27]

$$\vec{r}_{r0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vec{k}_0 \cdot \vec{Q}_k(t_C, s_{kC}) \\ 1 \end{bmatrix}; \quad \vec{k}_{r0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \vec{j}_{r0} = \begin{bmatrix} \vec{i}_0 \cdot \vec{Q}_k(t_C, s_{kC}) \\ \vec{j}_0 \cdot \vec{Q}_k(t_C, s_{kC}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

6. Находим точку пересечения оси  $X_r$  системы координат секущей плоскости  $r$  с номинальной поверхностью детали, путем решения относительно параметрического угла профиля вала ( $\theta_r$ ) уравнения

$$\vec{l}_r \cdot \overline{A_r \cdot \vec{r}_0(\theta, z)} = 0, \quad (3.5)$$

где

$$z = \vec{k}_0 \cdot \vec{Q}_k(t_c, s_{kC}). \quad (3.6)$$

7. Определим величину  $\Delta_k$ , максимального отклонения обработанного  $k$ -й и  $k+1$ -й СМП участка профильного вала от номинального значения, как

$$\Delta_k = \left| A_r \cdot \vec{Q}_k(t_c, s_{kC}) \right| - \left| \vec{r}_0(\theta_r, z) \right|. \quad (3.7)$$

На рисунке 3.3 представлен результат расчета в программе Maple углового шага СМП относительно углового положения предыдущей СМП при радиусе фрезы  $R_f = 200$  мм для различных квалитетов точности, обработанного вала.

Для получения работоспособной конструкции данной фрезы необходимо выполнить подбор конструктивных параметров проектируемой фрезы и режимов резания, обеспечивающих экономически целесообразные показатели стойкости. Оценка периода стойкости каждой СМП фрезы может быть выполнена на основе известных стойкостных зависимостей [39] с учетом особенностей процесса съема припуска [62].

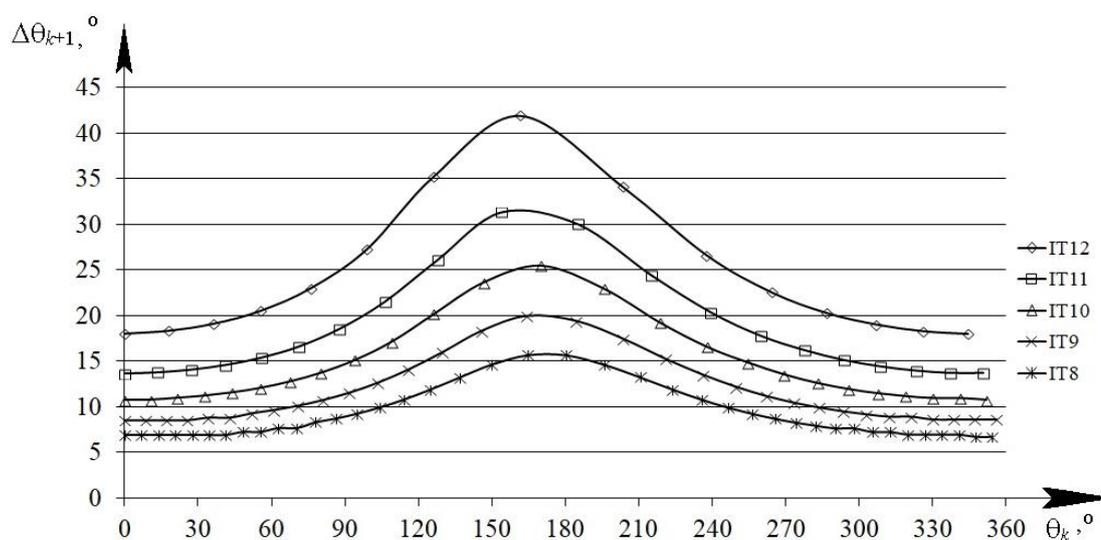


Рис. 3.3. Зависимость углового шага размещения СМП от квалитета точности при радиусе фрезы  $R_f = 200$  мм

На рис. 3.4 представлен результат расчета величин  $\Delta_k$  для РК-профильного вала с радиусом  $R = 40$  мм и эксцентриситетом  $e = 3,4$  мм, фрезой с радиальной конструктивной подачей радиусом  $R_f = 200$  мм и числом зубьев 25, расположенных с равномерным угловым шагом.

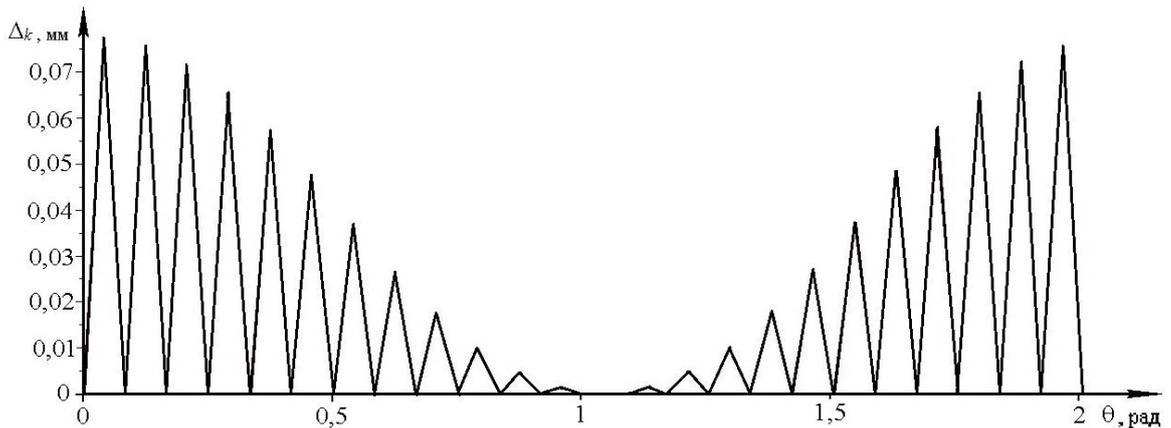


Рис. 3.4 График изменения высоты отклонения профиля в радиальном направлении при обработке фрезой с параметрами  $R_f = 200$ ,  $R = 40$ ,  $Z = 25$

По графику (рис. 3.4) можно сделать вывод, что величина  $\Delta_k$  не одинакова на различных участках профиля, что приведет к неравномерности снимаемого припуска на последующих чистовых операциях.

Для снижения неравномерности припуска и выравнивания высоты отклонения профиля необходимо рассмотреть вопрос неравномерного углового распределения пластин СМП [27, 48].

Если величину  $\Delta_k$ , представить как функцию

$$\Delta_k = f_k(R_f, \theta_k, \Delta\theta_{k+1}), \quad (3.8)$$

зависящую от среднего радиуса фрезы, текущего положения  $k$ -й СМП и углового шага  $k+1$ -й СМП, то, с применением алгоритма, представленного на рис. 3.5 можно определить число зубьев фрезы и величины угловых положений СМП, при которых будет выполняться условие:

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_k \leq T\Delta_r. \quad (3.9)$$

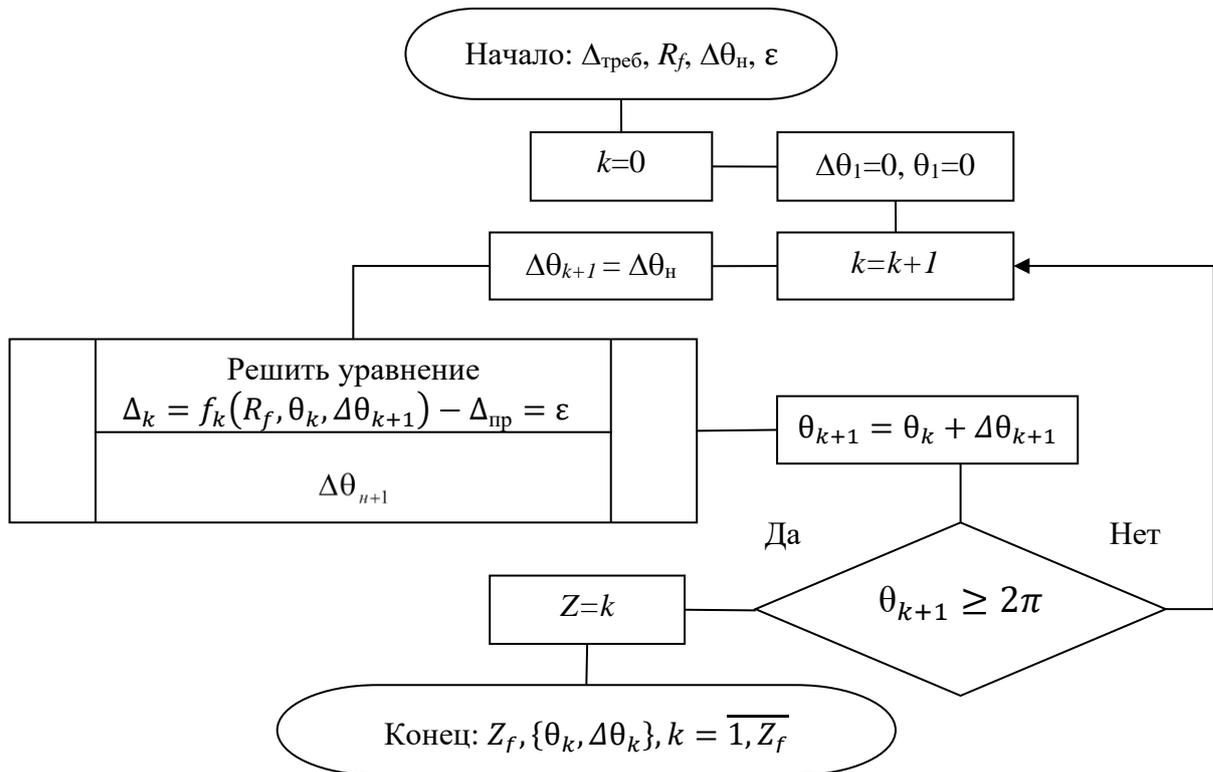


Рис. 3.5. Алгоритм расчета углов расположения СМП

С применением данного алгоритма для вала  $R = 40$  и  $e = 3,4$  был выполнен расчет числа зубьев фрезы при различном значении  $T\Delta_r$ , соответствующем определенному качеству точности (по ГОСТ 24643–81 для нормальной относительной геометрической точности) и различных радиусах фрезы, результат, которого представлен в табл. 3.1. В числителе приведено значение чисел зубьев при равномерном угле распределения СМП – в знаменателе при неравномерном.

Таблица 3.1 Расчетное количество пластин СМП в зависимости от среднего радиуса фрезы-протяжки и качества точности

$R_f$ , мм	$T\Delta_r$ , мкм / ITn				
	13,8 IT8	22,2 IT9	36 IT10	57 IT11	100 IT12
200	48/40	38/32	29/25	23/20	17/15
150	49/41	38/32	29/25	23/20	17/15
100	49/41	39/33	30/26	24/21	18/16
50	50/42	40/33	30/26	25/21	19/16

Высота отклонения профиля при неравномерном угловом расположении в среднем уменьшается на 50% и принимает равномерный характер (рис. 3.6)

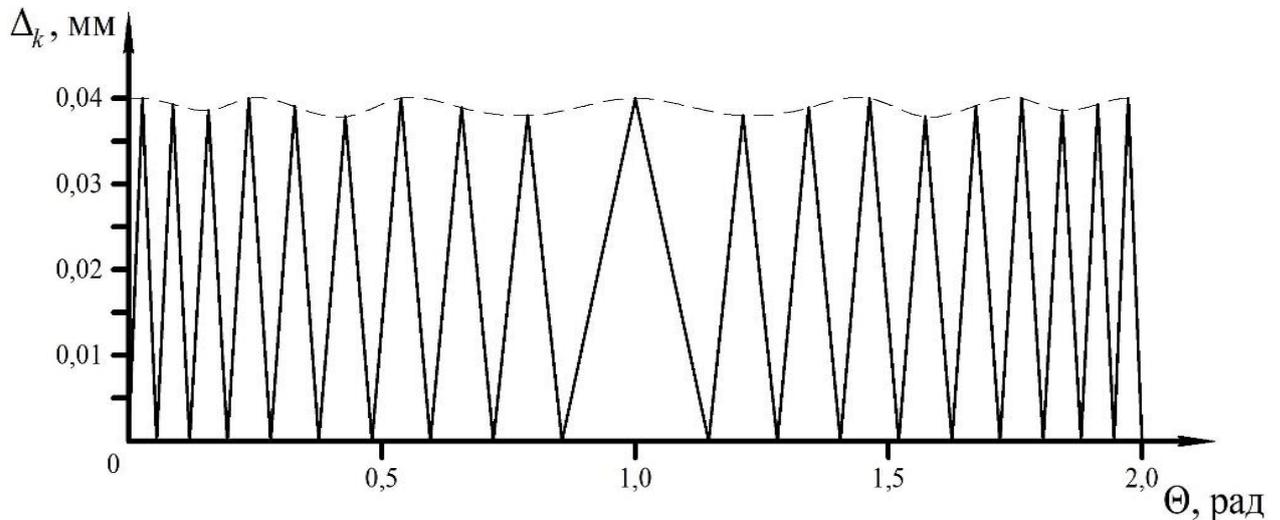


Рис. 3.6 График изменения высоты отклонения профиля в радиальном направлении при обработке фрезой с параметрами  $R_f = 200$ ,  $R = 40$ ,  $Z = 25$  с неравномерным угловым шагом

Таким образом, применив данный метод расчета положения СМП, можно получить выравнивание отклонений от номинального профиля в радиальном направлении при обработке детали с РК-профилем сборной фрезой. Однако, для получения работоспособной конструкции данной фрезы, требуются дальнейшие исследования процесса износа СМП.

### 3.2 Разработка метода расчета параметров срезаемых слоёв

В качестве основы для создания метода расчета параметров срезаемых слоев был выбран метод, описанный в работах [58, 66], который был модифицирован, в части учета заданного передаточного отношения между вращением заготовки и фрезы и наличия для данного способа обработки движений формообразования: вращения фрезы и вала, и осевой подачи.

Слой припуска, удаляемые  $i$ -ой режущей кромкой за оборот главного движения, который в данном случае равен одному обороту инструмента и одной трети поворота детали, может быть описан переменными, в общем случае

определяемыми вдоль режущей кромки и во времени  $t$  толщиной  $a_i(S_i, t)$ , шириной  $b_i(t)$  и длиной  $l_i(S_i)$ . Схема расчета по данным параметрам учитывает пространственную интерференцию поверхностей резания, образуемых различными режущими кромками СМП [66, 69].

Схема расчета параметров срезаемого слоя заключенного между двумя поверхностями резания, образованными соседними режущими кромками применительно к фрезерованию приведена в работах [25, 64].

Толщину срезаемого слоя будем определять в направлении оси  $Z_j$  системы координат  $X_j Y_j Z_j$  (рис. 3.7), начало которой расположено в точке поверхности резания образованной  $i$ -ой режущей кромки  $\bar{Q}_i(S_i, t)$ .

Направление оси  $Z_j$  совпадает с направлением вектора

$$\begin{aligned} \bar{N}_p(S_i, t) = & [\bar{Q}_{ih}(S_i, t) \times \bar{Q}_{it}(S_i, t)] \times \\ & \times \text{sign}\{-[\bar{Q}_{ih}(S_i, t) \times \bar{Q}_{it}(S_i, t)] \times \overline{A_{\Pi l} \cdot N_{zi}}\}, \end{aligned} \quad (3.10)$$

где  $\bar{Q}_{is}(S_i, t)$  - производная поверхности резания по параметру  $S_i$ , в сокращенной записи;

$\bar{Q}_{it}(S_i, t)$  - производная поверхности резания по параметру времени  $t$ ;

$\bar{N}_{zi}$  - вектор нормали к задней поверхности  $i$ -й режущей кромки (см. п. 2.2);

$A_{\Pi i}^{-1}$  - матрица установки передней поверхности.



$S_{(i+1)min}$ ,  $S_{(i+1)max}$  - минимальный и максимальный параметр режущей кромки;

$\bar{l}_j$ - единичный вектор, по оси координат  $X_j$ ;

$\bar{j}_j$ - единичный вектор, по оси координат  $Y_j$ .

Анализ схемы срезания припуска позволяет сделать вывод, что при отсутствии радиальной подачи инструмента основной срезаемый слой заключен между поверхностями резания, образованных  $i$ -ой режущей кромкой и  $(i+1)$ -ой режущей кромкой.

Толщина срезаемого слоя, после решения системы уравнений (3.8) или уравнения (3.9), может быть определена, как

$$a_{1i}(S_i, t) = F_{1i}(S_i, t) \cdot F_{2i}(S_i, t) \cdot \overline{A_j^{-1} \cdot Q_{i+1}(S_{i+1}, t + \Delta t)} \cdot \bar{k}_j, \quad (3.12)$$

где  $F_{1i}(h_i, t)$  - функциональный переключатель, который равен 1, если точка  $i$ -той режущей кромки в момент времени  $t$  находится в зоне припуска и 0, если вне зоны припуска

$$F_{1i}(h_i, t) = 0,5 \cdot \left[ \text{sign} \left( R_2 - \sqrt{(\bar{l}_0 \cdot \bar{Q}_i(h_i, t))^2 + (\bar{j}_0 \cdot \bar{Q}_i(h_i, t))^2} \right) + 1 \right]; \quad (3.13)$$

где  $R_2$ - радиус заготовки;

$\bar{l}_0$ - единичный вектор, по оси координат  $X_0$ ;

$\bar{j}_0$ - единичный вектор, по оси координат  $Y_0$ ;

$F_{2i}(h_i, t)$  -функциональный переключатель, который равен 1, если  $\overline{A_j^{-1} \cdot Q_{i+1}(h_{i+1}, t + \Delta t)} \cdot \bar{k}_j$  имеет положительное значение и 0, если имеет отрицательное значение

$$F_{2i}(h_i, t) = 0.5 \left\{ \text{sign} \left[ \overline{A_j^{-1} \cdot Q_i(h_i, t + \Delta t)} \cdot \bar{k}_j \right] + 1 \right\}, \quad (3.14)$$

где  $\bar{k}_j$  - единичный вектор, по оси координат  $Z_j$ .

Для оценки распределения нагрузки вдоль режущих кромок СМП выполним графическое представление схемы срезания припуска, позволяющее опре-

делять с достаточной степенью точности участие тех или иных участков режущих кромок в снятии припуска в процессе обработки, а также распределение толщины срезаемого слоя вдоль режущей кромки и ширину [59, 66].

После проведенных расчетов срезаемых слоев для различных вариантов углов установки СМП делаем вывод что при неравномерном распределении СМП происходит выравнивание толщины снимаемого припуска, в соответствии со схемой на рис. 3.8.

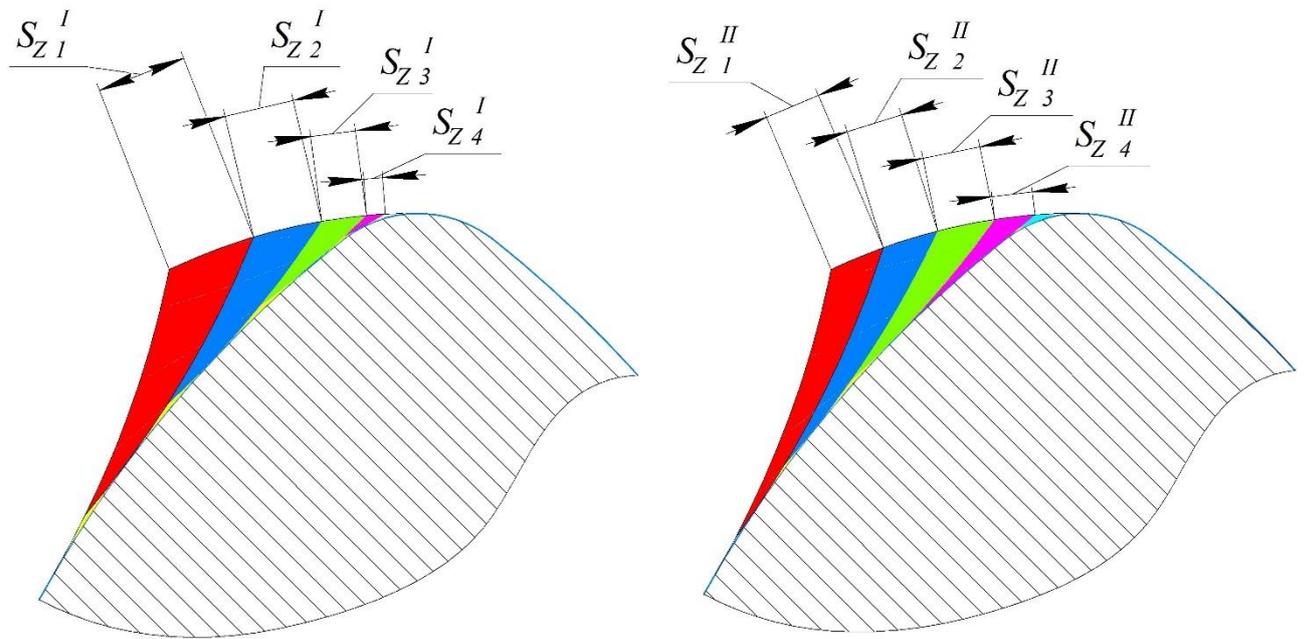


Рис. 3.8 Схема снятия припуска при фрезеровании РК-профиля; а) при равномерном распределении зубьев, б) при неравномерном распределении зубьев

Расположение зубьев с переменным шагом позволит выровнять припуск при обработке большей части стороны РК-профиля, что должно привести к выравниванию как стойкостных характеристик, так и силовых параметров резания. Исследование данных характеристик и параметров необходимо для определения конструктивных параметров фрезы-протяжки.

### 3.3 Разработка метода расчета стойкостных характеристик сборной дисковой фрезы-протяжки при обработке РК-профильных ступеней валов

Исследуем влияние выравнивания снимаемого припуска между СМП фрезы на период стойкости отдельных зубьев и минимальный период стойкости СМП, которая и обеспечивает период стойкости всего инструмента [46, 49].

Для конструкции фрезы с равномерным угловым шагом расположения СМП, была установлена величина неравномерности погрешности обработки различных участков профиля вала, в связи с чем было предложено располагать СМП с переменным угловым шагом. Был разработан метод расчета угловых шагов СМП из условия обеспечения равномерности погрешности обработанного профиля, соответствующей различным квалитетам точности.

Так период стойкость  $i$ -й СМП фрезы будем рассчитывать по формуле:

$$T_i = \sqrt[m]{\frac{C_v \cdot D_i^q}{V_i \cdot t_i^x \cdot s_{z_i}^y \cdot B_i^u \cdot Z_i^p}} \cdot K_v, \quad (3.15)$$

где  $D_i$  – диаметральное положение  $i$ -й СМП;

$s_{z_i}$  – усредненная величина подача на зуб  $i$ -й СМП;

$t_i$  – глубина обработки, соответствующей  $i$ -й СМП;

$B_i$  – ширина обработки соответствующая  $i$ -й СМП;

$Z_i$  – приведенное число зубьев;

$C_v, q, m, x, y, u, p$  – коэффициенты и показатели степени;

$K_v$  – общий поправочный коэффициент на скорость резания, учитывающий фактические условия резания [39].

Диаметральное расположение  $i$ -й СМП можно определить, как

$$D_i = |\bar{r}_{fi}(\theta_i)|, \quad (3.16)$$

где  $\bar{r}_{fi}(\theta_i)$  – векторное уравнение профиля производящей поверхности, определяющую точку установки СМП;

$\theta_i$  – угловой шаг соответствующей  $i$ -й СМП.

Усредненную величину подачи на зуб для  $i$ -й СМП определим, как

$$s_{zk} = \frac{\int_{s_H}^{s_K} s_z(s) ds}{s_K - s_H}, \quad (3.17)$$

где  $s_H, s_K$  – параметр длины режущей кромки  $i$ -й СМП соответствующей граничным точкам режущей кромки, контактирующим со срезаемым слоем;

$s_z(s)$  – функция величины подачи на зуб в заданной точке режущей кромки;

$s$  – параметр длины режущей кромки  $i$ -й СМП.

Глубина обработки соответствующая  $i$ -й СМП в проекции на плоскость  $XOY$  определяется как

$$t_i = |\bar{Q}_i(S, \tau_K) - \bar{Q}_i(S, \tau_H)|_{XOY}, \quad (3.18)$$

где  $\bar{Q}_i(S, \tau_K), \bar{Q}_i(S, \tau_H)$  – точки на поверхности резания, образованной движением точки  $(S)$  режущей кромки  $i$ -й СМП от момента времени начала контакта с припуском ( $\tau_H$ ) и окончания контакта ( $\tau_K$ ).

Скорость резания  $V_i$  определяем как

$$V_i = |\bar{Q}_{it}(S, \tau_K)|, \quad (3.19)$$

где  $\bar{Q}_{it}(S, \tau_K)$  – производная поверхности резания по времени, соответствующая моменту времени  $\tau_K$ .

Усредненная величина ширины обработки определяется по формуле

$$B_i = \frac{\int_{\tau_H}^{\tau_K} B(\tau) d\tau}{\tau_K - \tau_H}, \quad (3.20)$$

где  $B(\tau)$  – ширина фрезерования, соответствующая режущей кромки  $i$ -й СМП в момент времени  $\tau$ .

Приведенное число зубьев определим, как

$$z_i = \left| \frac{2\pi}{\Delta\theta_i} \right|, \quad (3.21)$$

На рис. 3.9 показан результат расчета величины периода стойкости СМП фрезы с параметрами  $R_f = 200$  мм и  $Z = 25$  при постоянном и переменном угловом шаге при обработке вала с РК-профилем с параметрами  $R = 80$  мм и эксцентриситетом  $e = 3,4$ .

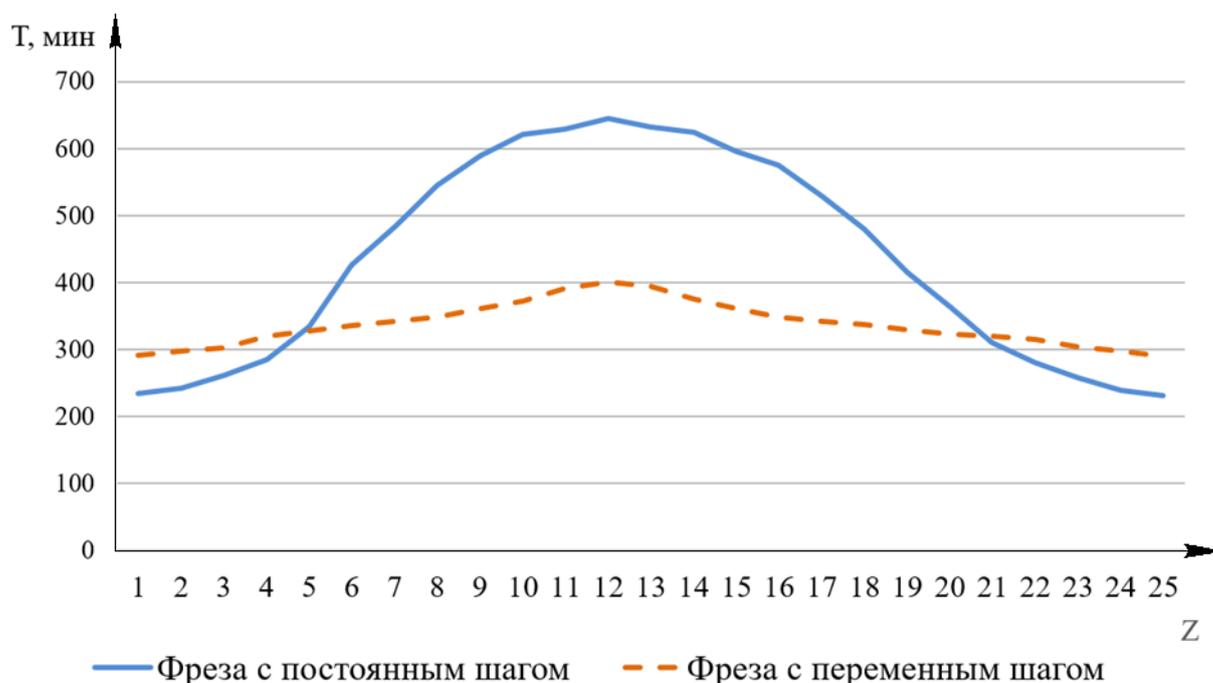


Рис. 3.9 Расчетные периоды стойкости режущих пластин при равномерном и переменным угловым шагом пластин

Из графика на рис. 3.9 видно, что размах значений периода стойкости СМП  $\Delta T$  при постоянном шаге составляет более 400 мин., при переменном около 110 мин. Таким образом можно утверждать, что для данной фрезы применение неравномерного шага позволило снизить размах периода стойкости зубьев на 73,1% и повысить общий период стойкости инструмента на 25% при одинаковых режимах обработки.

На рисунке 3.10 показаны результаты исследования изменения величины размаха периода стойкости для фрезы с  $R_f = 200$  мм и разным числом СМП.

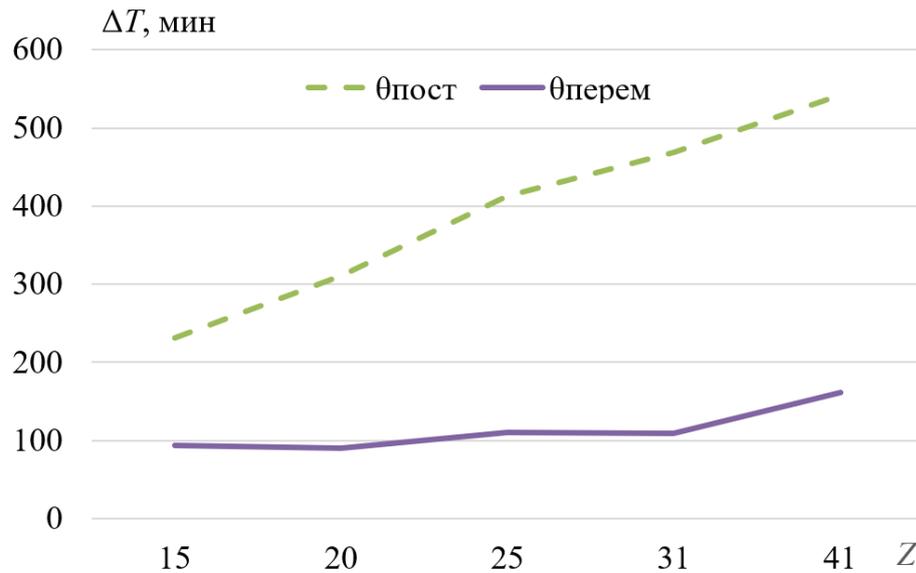


Рис. 3.10 Изменение размаха периода стойкости  $\Delta T$  зубьев фрезы ( $R_f = 200$  мм) при постоянном и переменном шаге расположения

На рисунке 3.12 указано изменение размаха периода стойкости  $\Delta T$  при различном количестве СМП для фрез с различным радиусом.

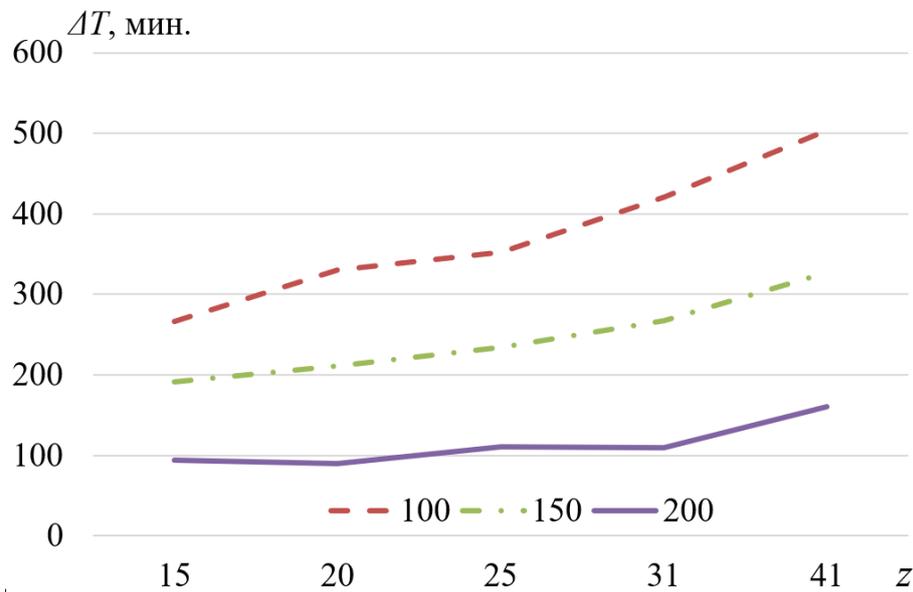


Рис. 3.11 Изменение размаха периода стойкости  $\Delta T$  зубьев фрезы при разном  $R_f$

Полученные данные позволили установить, что размах изменения периода стойкости и минимальное значение периода стойкости при расположении пластин с переменным шагом зависит также от радиуса фрезы  $R_f$  и количества

зубьев. Увеличение количества зубьев фрезы-протяжки, как и увеличение среднего радиуса фрезы приводят к снижению размаха периода стойкости и повышению ее минимального уровня для инструмента. Следовательно увеличение количества зубьев фрезы-протяжки, как и увеличение среднего радиуса приводят к снижению отклонений периода стойкости и повышению его минимального уровня для инструмента.

Необходимо также учитывать ограничения на габариты и массу инструмента, накладываемые технологическими возможностями оборудования, что является основанием для дальнейших исследований.

### **3.4 Разработка методики корректирования положения зубьев при их добавлении для снижения неравномерности их периода стойкости**

Оценка периода стойкости СМП данных фрез-протяжек, выполненная с учетом переменных по времени параметров фрезерования для каждой СМП, а именно: усредненной величины подача на зуб, глубины и ширины обработки, показала, что они будут изнашиваться неравномерно (рис. 3.13) [49].

Для оценки неравномерности периода стойкости СМП было введено понятие коэффициента неравномерности периода стойкости  $K_T$ :

$$K_T = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max}}, \quad (3.22)$$

где  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ , - максимальное и минимальное значений периода стойкости СМП фрезы (см. рис. 3.12).

Данный коэффициент, в частности, для фрезы, обработка которой обеспечивает погрешность формы, соответствующей при нормальной точности 10 качеству по диаметральному размеру ( $Z = 25$ ), равен 0,52.

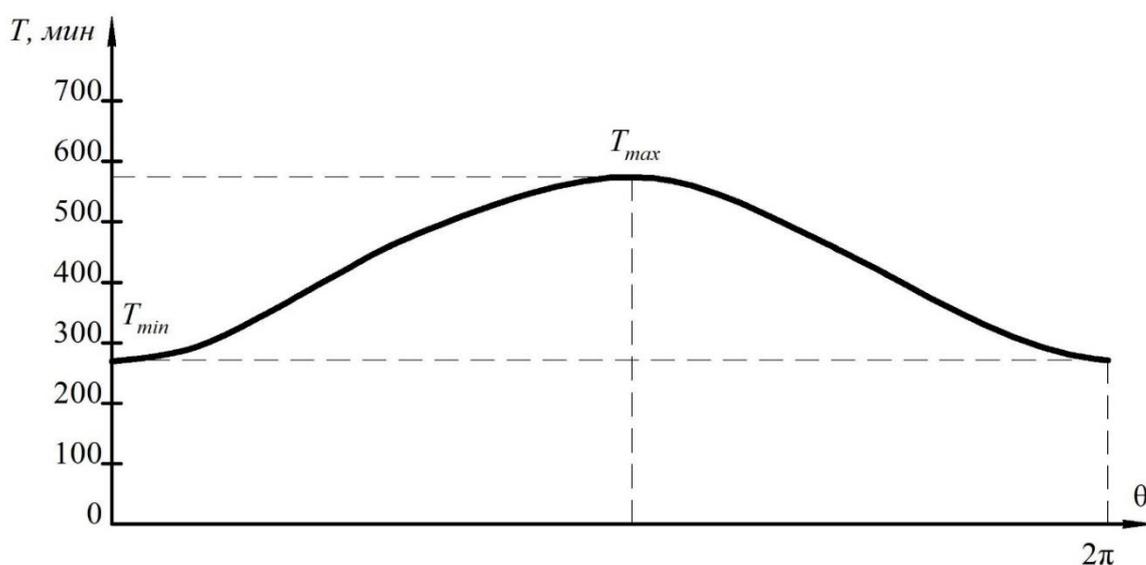


Рис. 3.12 Зависимость периода стойкости СМП фрезы-протяжки, при  $R_f = 100$  мм и  $Z = 25$  от их углового положения

Анализ изменения периода стойкости показал, что наименьшим периодом стойкости обладает СМП обрабатывающие участки впадин РК-профиля, соответствующие значению углового положения СМП в окрестностях  $0$  ( $2\pi$ ) на производящей поверхности инструмента. Повышение периода стойкости этих СМП и соответственно снижение неравномерности периода их стойкости возможно путем увеличения общего числа СМП в пределах заданной точности обработки (см. рис. 3.8) и более плотного их расположений в окрестностях участка производящей поверхности, формирующей впадину РК-профиля.

Решение данной задачи сводится к формированию массивов

$$\{\theta_{zk}\}_{k=1, \overline{Z+1}} \text{ и } \{\Delta\theta_{zk}\}_{k=1, \overline{Z+1}}, \quad (3.23)$$

где  $\theta_{zk}$  – угловое положение  $k$ -й СМП, при их общем числе  $Z$ ;

$\Delta\theta_{zk}$  – угловой шаг  $k$ -й СМП, при их общем числе  $Z$ ;

$Z$  – принятое общее число СМП фрезы-протяжки в диапазоне  $Z_1 < Z < Z_2$ ;

где  $Z_1$  – число СМП фрезы-протяжки, соответствующее заданному качеству точности обработки  $IT$ ;

$Z_2$  – число СМП фрезы-протяжки, соответствующее следующему, более точному качеству  $IT-1$  (см. рис. 2), на основе имеющихся массивов

$$\{\theta_{1i}\}_{i=1, \overline{Z_1+1}} \text{ и } \{\Delta\theta_{1i}\}_{i=1, \overline{Z_1+1}}, \quad (3.24)$$

$$\{\theta_{2j}\}_{j=1, \overline{Z_2+1}} \text{ и } \{\Delta\theta_{2j}\}_{j=1, \overline{Z_2+1}} \quad (3.25)$$

где  $\theta_{1i}$  – угловое положение  $i$ -й СМП фрезы-протяжки, соответствующее заданному качеству точности обработки  $IT$ ;

$\Delta\theta_{1i}$  – угловой шаг  $i$ -й СМП фрезы-протяжки, соответствующие заданному качеству точности обработки  $IT$ ;

$\theta_{2j}$  – угловое положение  $j$ -й СМП фрезы-протяжки, соответствующее следующему, более точному качеству  $IT-1$ ;

$\Delta\theta_{2j}$  – угловой шаг  $j$ -й СМП фрезы-протяжки, соответствующие следующему, более точному качеству  $IT-1$ .

Расчет элементов массивов (3.23) при заданном числе СМП выполним следующим образом:

1. Сформируем массив угловых шагов, с размерностью  $Z_1$ , на основе массивов (3.40), определяющий исходную функцию положения СМП для принятого числа  $Z$ , по формуле

$$\Delta\theta_{zi} = F_1(\theta_{1i}) - \Delta y_z \frac{(F_1(\theta_{1i}) - F_2(\theta_{1j})) |\theta_{1i} - \theta_{max}|^{0,2}}{(\Delta\theta_{1,2} - \Delta\theta_{2,2})\theta_{max}}, \quad (3.26)$$

где  $F_1(\theta_{1i})$  – интерполирующая функция, построенная на основе массива (3.40);

$F_2(\theta_{1j})$  – интерполирующая функция, построенная на основе массива (3.41);

$\Delta y_z$  – величина смещения исходной функции, определяющей положение второй СМП при их общем числе равном  $Z$  (рис. 3.14);

$\Delta\theta_{1,2}$ ,  $\Delta\theta_{2,2}$  – угловые шаги второй СМП для фрез-протяжек с числом СМП равным соответственно  $Z_1$  и  $Z_2$ ;

$\theta_{max}$  – угловое положение СМП, соответствующее наибольшему угловому шагу для фрезы-протяжки с числом СМП равным  $Z_1$  (см. рис. 3.13).

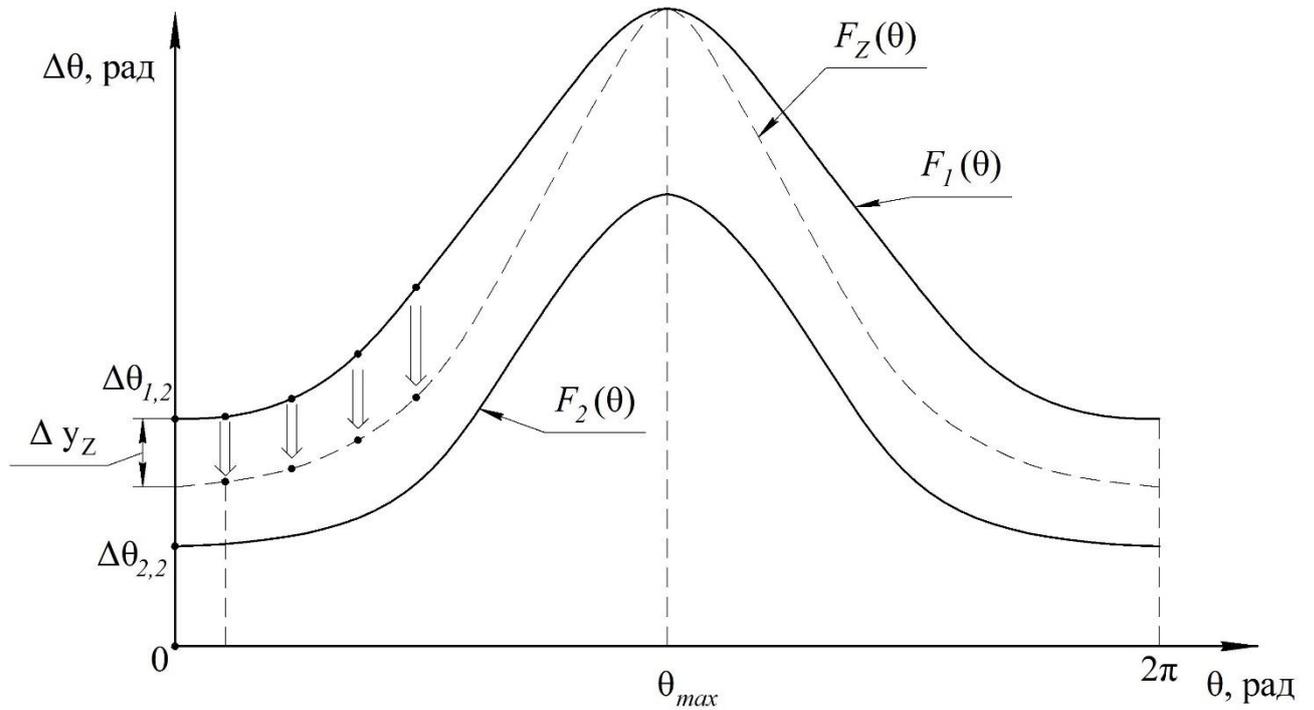


Рис. 3.13 Корректировка угловых шагов СМП фрезы-протяжки, соответствующих заданному качеству точности обработки  $IT$

2. Величину  $\Delta y_Z$  входящую в (3.42) и зависящую от принятого количества зубьев  $Z$  в диапазоне от  $Z_1$  до  $Z_2$  определим из уравнения (рис. 3.14)

$$\sum_{i=2}^{Z+1} \Delta\theta_{Zk} = 2\pi, \quad (3.27)$$

где  $\Delta\theta_{Zk}$  – определим, как

$$\Delta\theta_{Zk} = \sum_{j=2}^{k-1} \Delta\theta_{Zj} + F_Z \left( \sum_{j=2}^{k-1} \Delta\theta_{Zj}, \Delta y_Z \right), \quad (3.28)$$

где  $F_Z(\theta, \Delta y_Z)$  – интерполирующая функция, построенная на основе массива, сформированного с применением уравнения (3.26).

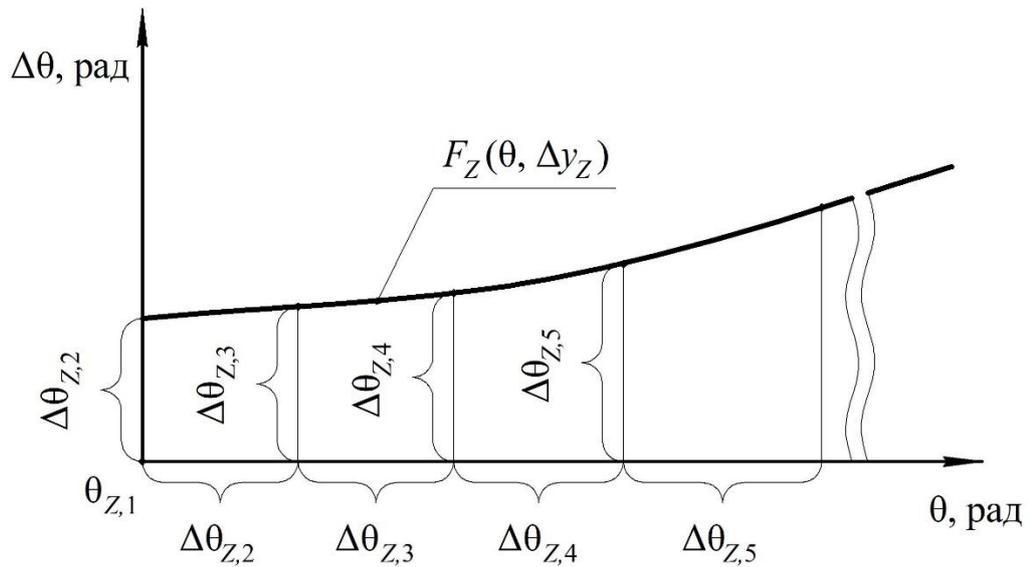


Рис. 3.14 Определение угловых шагов  $\Delta\theta_{zk}$  размещения СМП  
для фрезы-протяжки

Развернуто (3.44) можно представить, как:

$$\Delta\theta_{z,2} = F_Z(\theta, \Delta y_Z),$$

$$\Delta\theta_{z,3} = \Delta\theta_{z,2} + F_Z(\Delta\theta_{z,2}, \Delta y_Z),$$

$$\Delta\theta_{z,4} = \Delta\theta_{z,2} + \Delta\theta_{z,3} + F_Z(\Delta\theta_{z,2} + \Delta\theta_{z,3}, \Delta y_Z),$$

...

$$\Delta\theta_{z,Z+1} = \Delta\theta_{z,2} + \Delta\theta_{z,3} + \dots + \Delta\theta_{z,Z} + F_Z(\Delta\theta_{z,2} + \Delta\theta_{z,3} + \dots + \Delta\theta_{z,Z}, \Delta y_Z).$$

(3.29)

3. Угловые положение СМП  $\theta_{zk}$ , соответствующие их общему числу  $Z$  определим по формуле

$$\theta_{zk} = \sum_{i=1}^k \Delta\theta_{zi}. \quad (3.30)$$

Зависимость величины смещения исходной функции  $\Delta y_Z$ , определяющей положение второй СМП от количества добавляемых зубьев показана на рис. 3.15.

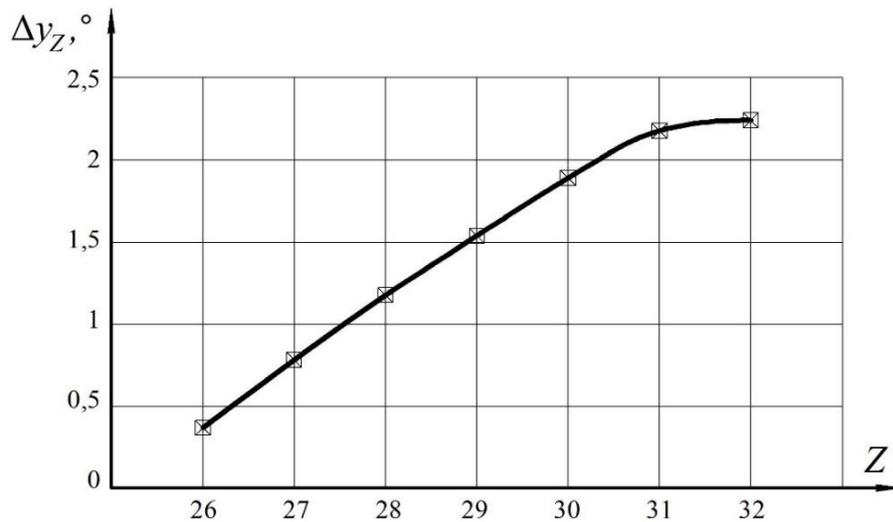


Рис. 3.15 Зависимость  $\Delta y_Z$  от числа зубьев  $Z$  в интервале от 26 до 32

Выполнение расчетов позволило сделать вывод, что увеличение числа СМП в пределах диапазона, определяемого требуемой точностью обработки ( $Z = 25 \dots 32$ ) при среднем радиусе фрезы  $R_f = 200$ , приводит к увеличению минимального периода стойкости СМП инструмента и уменьшению коэффициента неравномерности периода стойкости. Так, например, при увеличении числа зубьев до  $Z = 28$  коэффициент неравномерности периода стойкости зубьев снижается с 0,28 до 0,2, что означает уменьшение неравномерности периодов стойкости на 28,5% (см. рис. 3.16).

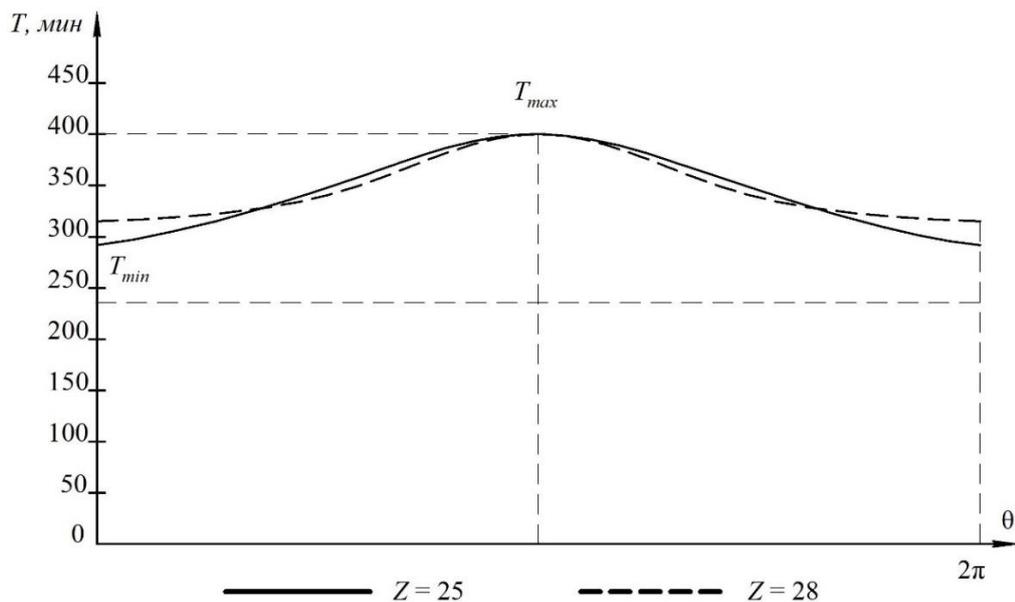


Рис. 3.16 Изменение периода стойкости СМП фрезы при увеличении количества зубьев  $Z$

На рисунке 3.17 показано изменение коэффициента неравномерности периода стойкости СМП  $K_T$  при увеличенном числе зубьев  $Z$  в диапазоне от 26 до 32.

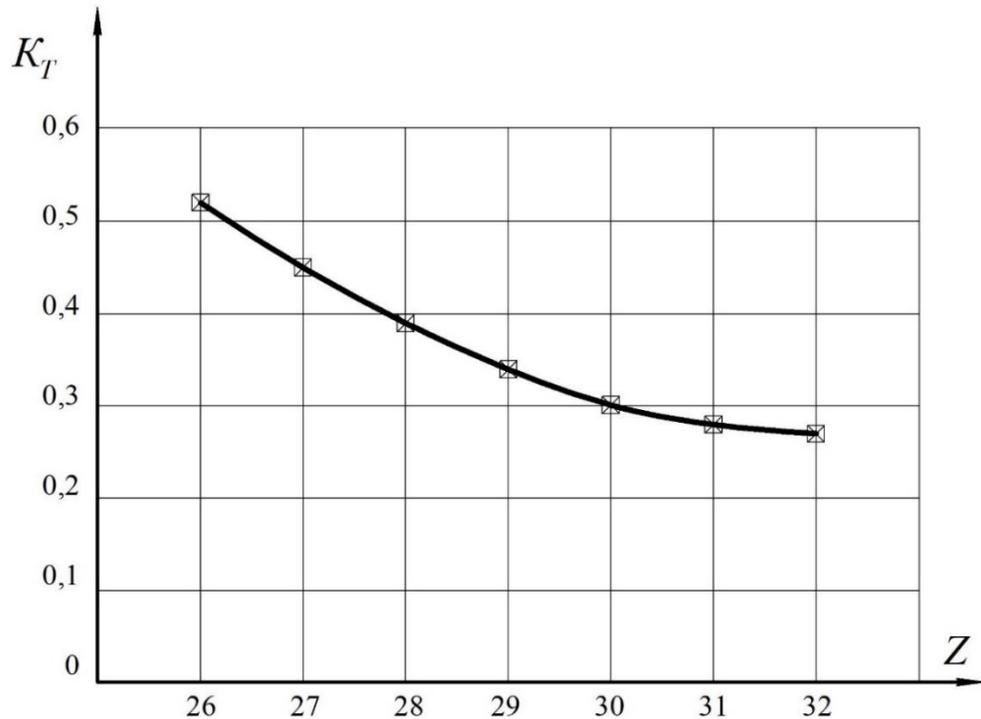


Рис. 3.17 Изменение коэффициента неравномерности периода стойкости СМП  $K_T$  при увеличении числа зубьев  $Z$  с 26 до 32

Таким образом, применение данного подхода к проектированию фрезы-протяжки для РК-профильного вала с параметрами  $R = 40$  мм и  $e = 3,4$  мм при среднем радиусе фрезы-протяжки  $R_f = 100$  мм, позволяет, при достижении 10 качества точности обработки снизить коэффициент неравномерности периода стойкости зубьев на 53%. Однако при принятии окончательного конструкторского решения необходимо также учитывать ограничения, связанные, прежде всего с возможностью размещения необходимого количества СМП в корпусе фрезы-протяжки при заданном среднем диаметре инструмента и принятой схеме крепления СМП.

### 3.5 Исследование изменения крутящего момента при обработке РК-профиля фрезой-протяжкой

Для определения характера изменения параметров обработки, таких как сил резания, крутящего момента и температурных параметров выполнено моделирование процесса фрезерования в специализированном инженерном программном комплексе, предназначенном для анализа процессов обработки металлов давлением, термической и механической обработки DEFORM™ [22, 45, 123, 125].

Исследование проводилось методом конечных элементов, на основе трехмерных моделей, выполненных в САД-системе. DEFORM позволяет моделировать процесс обработки детали различными способами, в том числе и фрезерованием. Моделирование процесса снятия стружки позволяет определить как температуру в зоне контакта, так и крутящий момент в текущий момент времени (см. рис. 3.18).

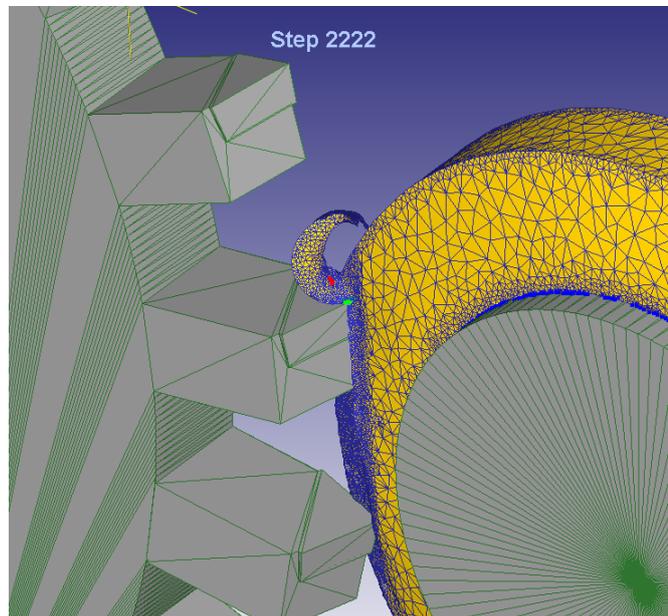


Рис. 3.18 Рабочее окно DEFORM. Зона снятия припуска

Моделирование обработки фрезами-протяжками с равномерным и неравномерным расположением пластин позволило сравнить параметры резания. Учитывая прерывистый характер обработки, особое внимание решено обратить на изменение крутящего момента в процессе обработки обеими вариантами

фрез. Размеры заготовки и инструмента, режимы обработки установлены следующие:

- средний радиус обрабатываемой РК-профильной поверхности – 40 мм;
- эксцентриситет РК-профильной поверхности – 3,4 мм;
- средний диаметр фрезы – 200 мм;
- частота вращения заготовки  $n_Z$  – 30 об/мин;
- частота вращения инструмента  $n_F$  – 90 об/мин;
- осевая подача –  $s_o = 0,044$  мм на оборот.

Результаты расчетов крутящего момента на этапе врезания фрезы-протяжки представлены на графике (рисунок 3.19).

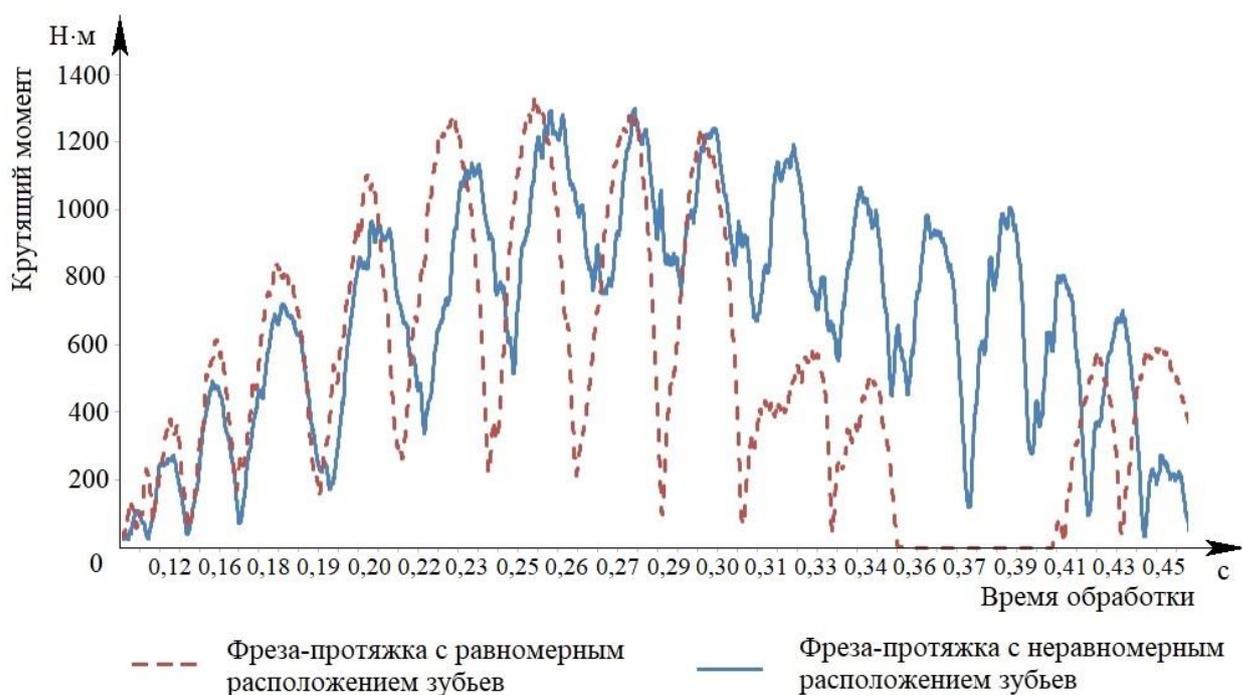


Рис. 3.19. Изменение крутящего момента при обработке фрезой – протяжкой при различном расположении зубьев, на этапе врезания

Сравнение характера изменения крутящего момента для фрез-протяжек с равномерным и неравномерным положением зубьев позволило сделать вывод, что применение неравномерного расположения зубьев сокращает среднюю амплитуду изменения крутящего момента при обработке РК-профильной поверхности на  $15 \div 55\%$ , причем наибольшее снижение амплитуды изменений

наблюдается при обработке части РК-профиля с минимальным радиусом. При этом максимальный крутящий момент при неравномерном расположении зубьев не превышает таковой для фрезы-протяжки с равномерным расположении зубьев.

Таким образом, применение фрезы протяжки с неравномерным расположением зубьев позволяет получить более стабильные силовые параметры резания, что в свою очередь влияет на качество и точность обработанной поверхности и снижении вибронагруженности инструмента.

Проведенные исследования конструктивных параметров фрезы-протяжки [48], в том числе угловое расположение зубьев, влияющих на качество обрабатываемой поверхности, период стойкости СМП и параметров резания позволяет сделать вывод, что неравномерное расположение зубьев фрезы позволяет кроме повышения качества обработки и повышения среднего периода стойкости СМП также получить более высокое качество обработанной поверхности РК-профиля за счет выравнивания параметров процесса резания.

### **3.6 Выводы**

1. Выполнен расчет необходимого количества СМП в зависимости от среднего радиуса фрезы-протяжки и достижимой точности по отклонению от заданной формы РК-профиля.

2. Выполнен расчет геометрических параметров срезаемых слоев при обработке РК-профиля и их изменение при неравномерном распределении СМП.

3. Выполнен расчет величины периода стойкости СМП фрезы-протяжки при обработке РК-профиля и определен размах изменения  $\Delta T$  при неравномерном размещении СМП.

4. Разработан метод снижения неравномерности периода стойкости СМП при неравномерном распределении путем добавления пластин и пересчета их угловых положений.

5. Исследовано изменение амплитуды крутящего момента при обработке РК-профильной поверхности фрезой-протяжкой с неравномерным расположением зубьев.

## Глава 4 Экспериментальное исследование процесса обработки РК-профильной поверхности фрезой-протяжкой

### 4.1 Разработка прототипа сборной фрезы-протяжки для проведения экспериментального исследования

Для проведения эксперимента проводилась обработка РК-профильной поверхности со средним радиусом  $R = 40$  мм и эксцентриситетом  $e = 3.4$ .

Выбор параметров РК-профильной ступени обоснован конструкцией деталей буровых установок, передача крутящего момента в которых в настоящее время осуществляется за счет трехгранного профиля (см. рис. 4.1).

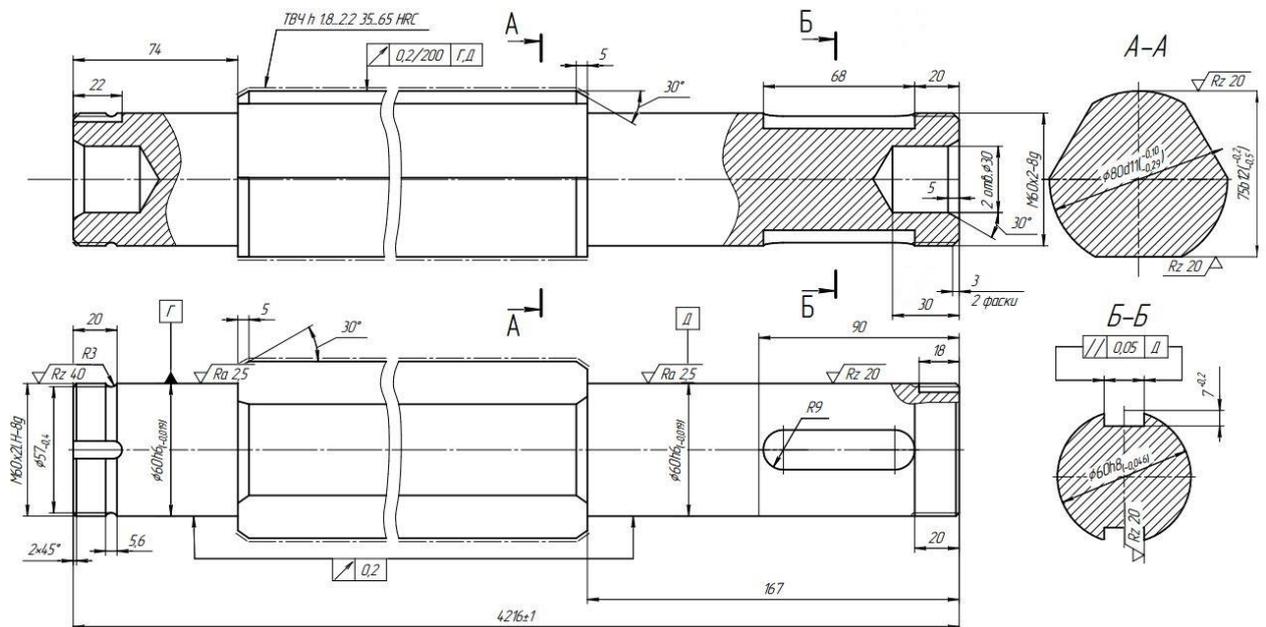


Рис. 4.1. Деталь «Штанга» буровой установки (АО «Геомаш», г. Щигры)

Замена трехгранного профиля на РК-профильную поверхность позволит исключить концентраторы напряжения такие как сопряжения цилиндрической части и плоских поверхностей лысок.

Для проведения эксперимента был спроектирован прототип сборной фрезы-протяжки средним радиусом  $R_f = 100$  мм и числом зубьев  $Z = 25$  [52]. В качестве зубьев применяются токарные резцы с СМП квадратной формы с главным углом в плане  $\varphi = 70^\circ$ . Используя выявленные зависимости (рис. 3.8) рас-

считываем положения зубьев и радиус вылета. Расчетные данные приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Рассчитанные параметры прототипа фрезы-протяжки

№ п/п	Угол расположения СМП °	Радиус расположения вершины СМП, мм	№ п/п	Угол расположения СМП °	Радиус расположения вершины СМП, мм
1	0,00	103,40	14	190,16	96,65
2	10,50	103,34	15	213,70	97,14
3	21,01	103,16	16	233,54	97,91
4	31,71	102,86	17	250,69	98,78
5	42,64	102,45	18	265,77	99,64
6	53,91	101,93	19	279,39	100,45
7	65,65	101,31	20	291,98	101,18
8	78,04	100,60	21	303,85	101,82
9	91,38	99,81	22	315,20	102,36
10	106,00	98,96	23	326,19	102,79
11	122,50	98,10	24	336,93	103,11
12	141,74	97,29	25	347,50	103,31
13	164,74	96,71	26*	358,08	103,40

\* - при корректировании положения СМП 26 зуб исключается.

На основании полученных данных выполнена трехмерная модель прототипа фрезы-протяжки в системе проектирования КОМПАС-3D (рис. 4.2). Адаптированный вариант 3D модели использовался для исследования силовых характеристик процесса обработки в программном пакете DEFORM (см. пункт 3.5).

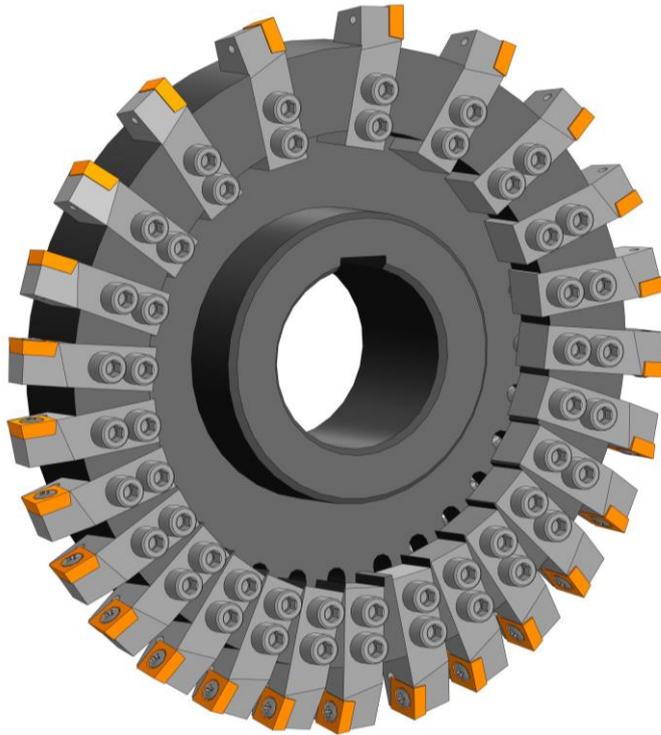


Рис. 4.2 3D-модель прототипа сборной фрезы-протяжки

На основе трехмерной модели изделия и рабочих чертежей был создан прототип фрезы протяжки (см. рис. 4.3).

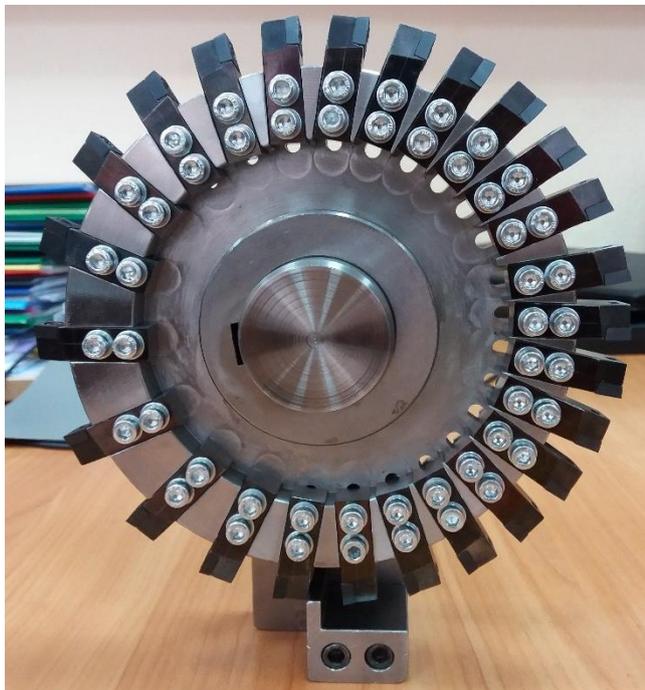


Рис. 4.3 Прототип сборной фрезы-протяжки с приспособлением для настройки вылета резцов

Угловое положение резцов определяется расположением пазов в соответствии с углами указанными в табл. 4.1. Для регулировки используется специальное приспособление (см. рис. 4.4) и набор концевых мер длины.

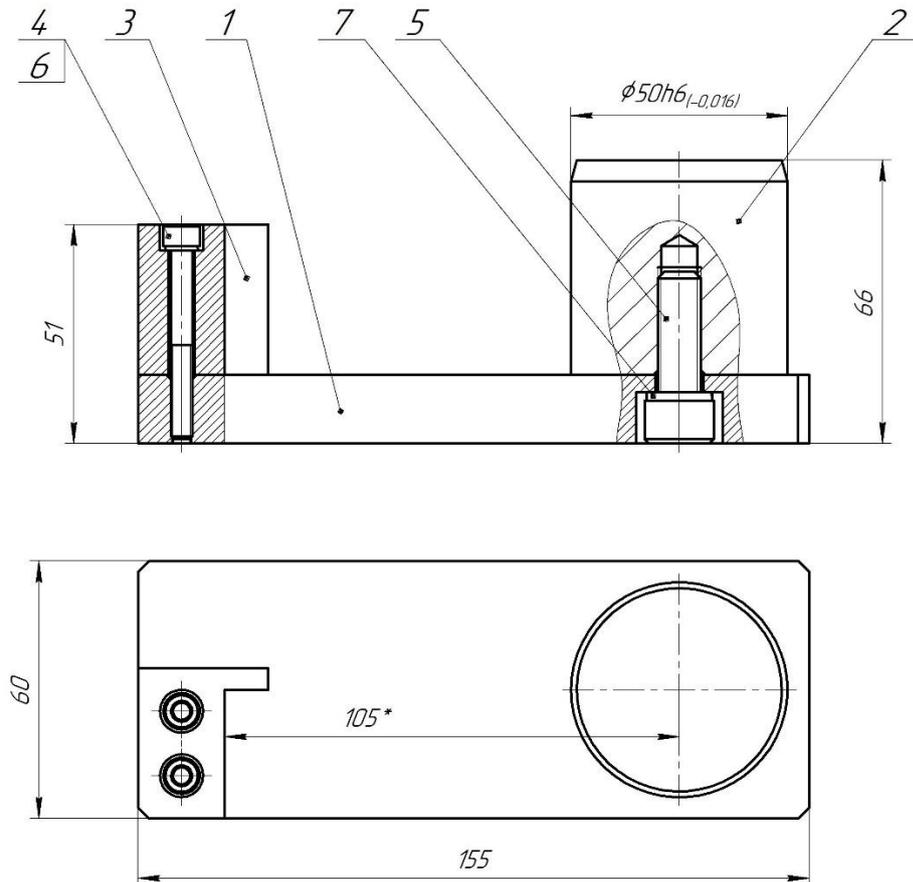


Рис. 4.4. Приспособление для настройки вылета резцов прототипа фрезы-протяжки:

*1 – основание; 2 – опора; 3 – упор; 4,5,6,7 – крепежные элементы*

Настройка вылетов резцов осуществляется путем подбора необходимого комплекта концевых мер длины и выставления вершины резца на требуемый размер с последующим закреплением.

Созданный прототип позволяет выполнять обработку ступени с РК профилем на экспериментальной установке, основанной на станке 1К62.

## 4.2 Создание экспериментальной установки для проведения опытной обработки РК-профильных ступеней.

Эксперимент производился на токарном станке 1К62, на заготовках из дюралюминиевого сплава для проверки качества обрабатываемой поверхности и стальных заготовках для исследования периода стойкости пластин.

Схема установки показана на рисунке 4.5.

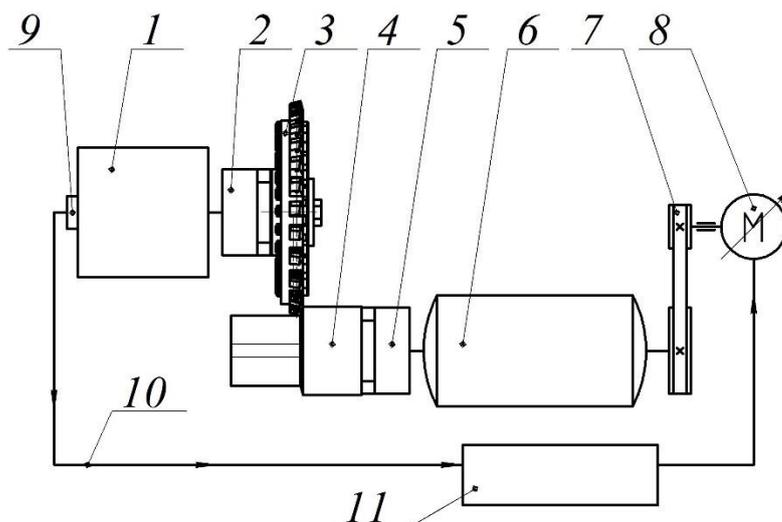


Рис. 4.5 Схема экспериментальной установки для обработки РК-профиля:

*1 – передняя бабка станка, 2 – патрон, 3 – фреза-протяжка, 4 – обрабатываемая деталь, 5 – патрон, 6 – промежуточная опора, 7 – зубчато-ременная передача, 8 – шаговый мотор, 9 – датчик Холла, 10 – сетевой кабель, 11 – контроллер с подключенным компьютером*

Принцип работы установки основан на точной синхронизации работы основного привода станка и дополнительного привода для заготовки, осуществляемой за счет применения датчика Холла, считывающего обороты главного привода и преобразователя оборотов, выполненного на базе контроллера и управляемого персональным компьютером. Точность синхронизации вращения инструмента и детали, обеспечиваемая контроллером достаточна для выполнения обработки деталей.

Общий вид лабораторной установки показан на рисунке 4.6.

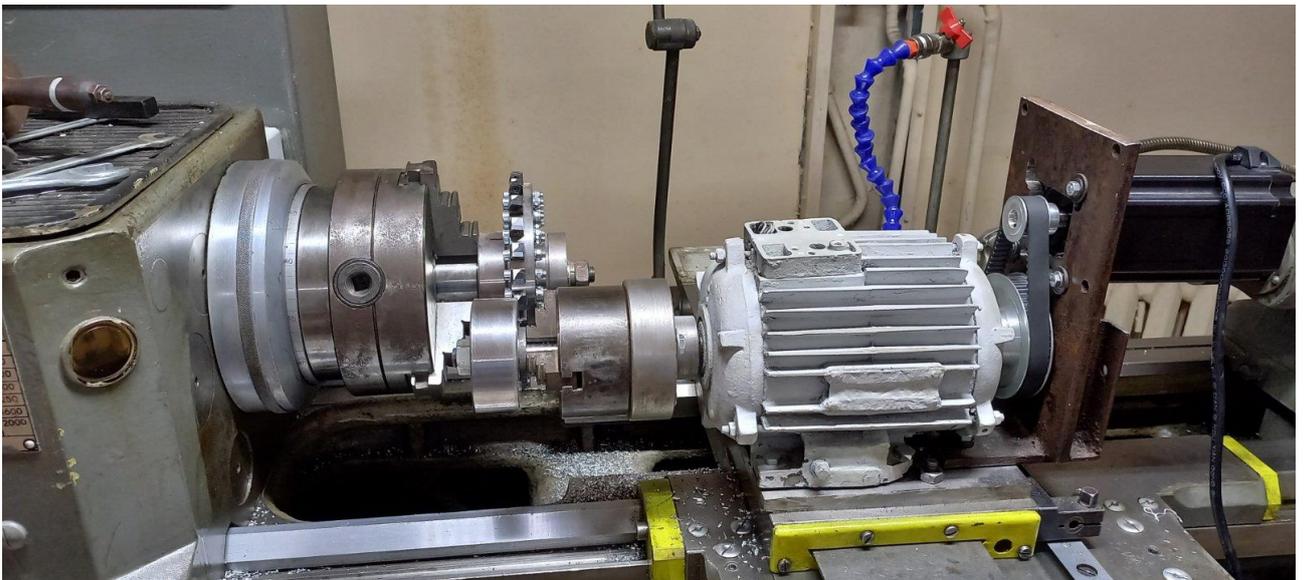


Рис. 4.6 Установка для проведения исследования качества обработки РК-профильной поверхности фрезой-протяжкой

Обработка выполнялась на следующих режимах:

Частота оборотов шпинделя станка –  $n_f = 120$  об/мин;

Частота вращения детали –  $n = 40$  об/мин;

Максимальная скорость резания –  $v = 87,6$  м/мин;

Осевая подача – 0,2 мм на оборот фрезы.

Образцы обработанной поверхности РК-профилей представлены на рис.

4.7.



а)



б)

Рис. 4.7 Результат обработки РК-профильной поверхности на детали из алюминиевого сплава (а) и из стали 45 (б)

### 4.3 Результаты измерения геометрических параметров обработанной поверхности.

Измерения отклонений от заданного профиля выполнялось на стенде, оснащённом индикаторной головкой ИЧ-25 (рис. 4.8). Измерения отклонений профиля, проводилось через  $1^\circ$  поворота детали. Точность поворота обеспечивалась шаговым двигателем [50, 51, 52].

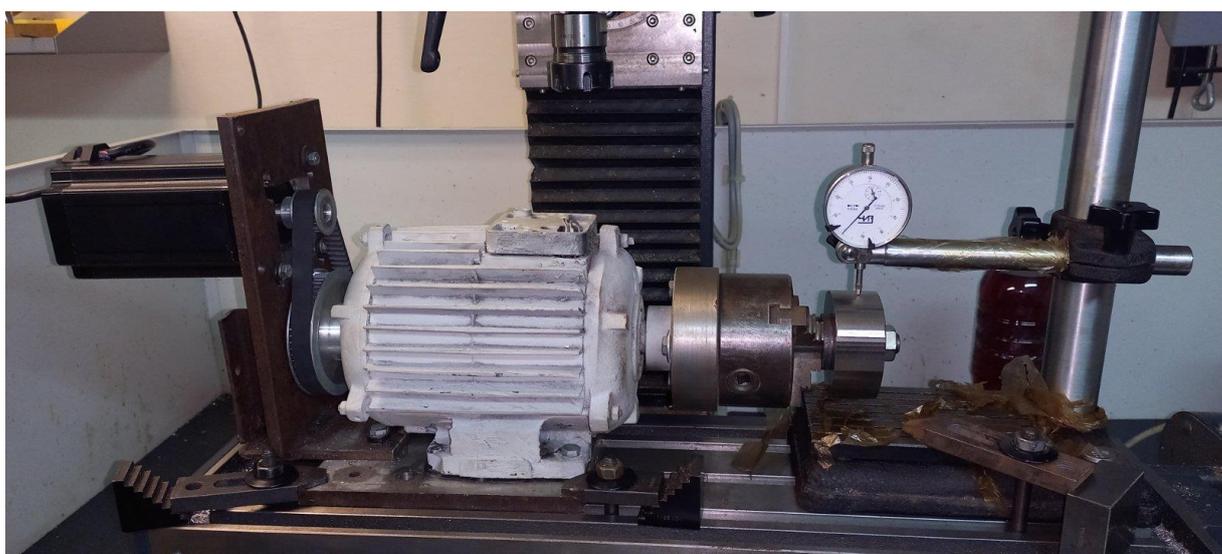


Рис. 4.8 Измерительный стенд для контроля отклонений от заданной формы

В результате проведенного измерений было установлено, что при обработке РК-профильной поверхности отклонения от заданного профиля близки к расчетным значениям и соответствуют допуску на отклонение формы для IT10 при нормальной точности. Значения отклонений  $\Delta_k$  не превышают значений 0,04 мм по модулю (см. табл. 4.2). Следует учесть, данный способ обработки предполагает последующую обработку другими методами, следовательно полученная точность формы достаточна для данного вида обработки.

Табл. 4.2 Измеренные данные и отклонения от номинальной поверхности

Угол профиля, град	Радиус номинальной поверхности, мм	Радиус измеренной поверхности, мм	Отклонение, мкм	Угол профиля, град	Радиус номинальной поверхности, мм	Радиус измеренной поверхности, мм	Отклонение, мкм
0	36,600	36,624	+23,9	61	43,384	43,397	+12,5
1	36,603	36,636	+33,0	62	43,339	43,342	+3,5
2	36,610	36,623	+13,0	63	43,266	43,272	+5,8
3	36,623	36,635	+12,1	64	43,171	43,186	+15,2
4	36,641	36,671	+30,4	65	43,057	43,081	+24,6
5	36,663	36,684	+20,9	66	42,927	42,961	+34,1
6	36,691	36,693	+2,0	67	42,784	42,815	+30,9
7	36,724	36,747	+22,7	68	42,632	42,654	+22,2
8	36,762	36,797	+34,6	69	42,470	42,484	+13,4
9	36,805	36,819	+13,8	70	42,303	42,307	+4,6
10	36,854	36,864	+10,7	71	42,130	42,141	+11,5
11	36,907	36,938	+31,1	72	41,953	41,975	+22,0
12	36,965	36,992	+26,6	73	41,773	41,805	+32,4
13	37,028	37,035	+6,3	74	41,591	41,624	+32,9
14	37,097	37,113	+16,7	75	41,408	41,429	+21,7
15	37,170	37,205	+35,3	76	41,224	41,234	+10,5
16	37,248	37,269	+21,0	77	41,040	41,043	+2,9
17	37,331	37,336	+4,5	78	40,857	40,873	+15,9
18	37,420	37,441	+21,9	79	40,676	40,705	+28,9
19	37,513	37,550	+36,8	80	40,496	40,530	+34,0
20	37,611	37,631	+19,9	81	40,318	40,338	+20,7
21	37,714	37,721	+7,0	82	40,142	40,149	+7,4
22	37,821	37,845	+23,9	83	39,969	39,975	+6,5
23	37,934	37,973	+39,0	84	39,798	39,819	+21,1
24	38,051	38,071	+19,6	85	39,631	39,667	+35,8
25	38,173	38,173	+0,2	86	39,468	39,492	+24,9
26	38,299	38,316	+16,9	87	39,307	39,319	+11,8
27	38,431	38,464	+33,9	88	39,151	39,161	+9,6
28	38,566	38,591	+24,6	89	38,999	39,022	+23,3
29	38,706	38,713	+7,1	90	38,850	38,883	+33,0
30	38,850	38,858	+7,4	91	38,706	38,725	+18,9
31	38,999	39,022	+23,0	92	38,566	38,571	+4,8
32	39,151	39,187	+35,4	93	38,431	38,447	+16,3
33	39,307	39,327	+19,8	94	38,299	38,331	+31,5
34	39,468	39,472	+4,2	95	38,173	38,197	+24,0
35	39,631	39,639	+8,0	96	38,051	38,061	+9,7
36	39,798	39,820	+21,5	97	37,934	37,949	+15,2

Угол профиля, град	Радиус номинальной поверхности, мм	Радиус измеренной поверхности, мм	Отклонение, мкм	Угол профиля, град	Радиус номинальной поверхности, мм	Радиус измеренной поверхности, мм	Отклонение, мкм
37	39,969	40,003	+34,9	98	37,821	37,852	+30,3
38	40,142	40,166	+24,3	99	37,714	37,738	+24,1
39	40,318	40,329	+11,6	100	37,611	37,619	+8,4
40	40,496	40,499	+3,1	101	37,513	37,530	+16,9
41	40,676	40,691	+15,2	102	37,420	37,454	+34,8
42	40,857	40,885	+27,4	103	37,331	37,355	+23,2
43	41,040	41,080	+39,5	104	37,248	37,253	+5,3
44	41,224	41,253	+28,9	105	37,170	37,192	+21,8
45	41,408	41,425	+17,4	106	37,097	37,134	+36,9
46	41,591	41,597	+5,9	107	37,028	37,044	+16,2
47	41,773	41,783	+10,2	108	36,965	36,972	+6,9
48	41,953	41,973	+19,9	109	36,907	36,935	+28,7
49	42,130	42,159	+29,6	110	36,854	36,883	+29,3
50	42,303	42,342	+39,2	111	36,805	36,812	+6,9
51	42,470	42,502	+31,6	112	36,762	36,777	+14,5
52	42,632	42,654	+22,5	113	36,724	36,760	+35,5
53	42,784	42,798	+13,3	114	36,691	36,711	+19,6
54	42,927	42,933	+5,7	115	36,663	36,671	+7,5
55	43,057	43,070	+13,5	116	36,641	36,668	+27,8
56	43,171	43,192	+21,3	117	36,623	36,656	+33,2
57	43,266	43,295	+29,0	118	36,610	36,626	+16,1
58	43,339	43,375	+36,8	119	36,603	36,602	-1,0
59	43,384	43,415	+30,4	120	36,600	36,601	+1,0
60	43,400	43,421	+21,4				

Среднее значение  $\Delta_{k \text{ ср.}} = +19,8$  мкм.

На рисунке 4.8 показано отклонение радиуса измеренной поверхности от идеальной поверхности, отклонения показаны условно увеличенными.

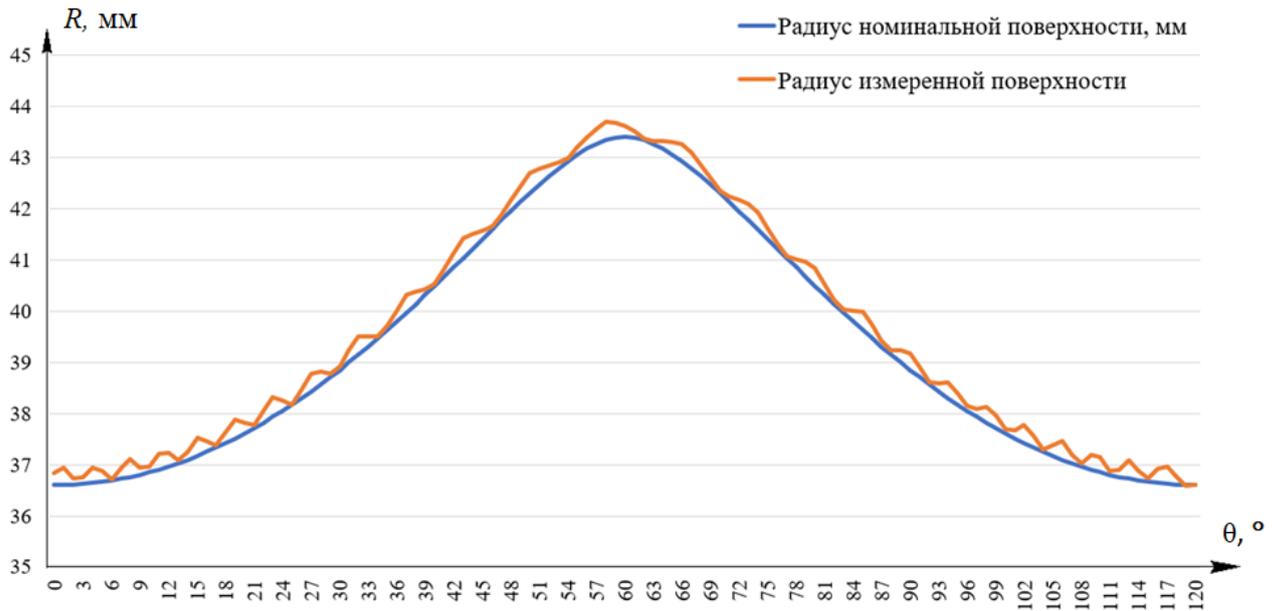


Рис. 4.8 График радиуса поверхности РК-профиля

На рисунке 4.9 показан график изменения отклонения  $\Delta_k$  от идеальной поверхности. В результате проведенного эксперимента было установлено, что при обработке РК-профильной поверхности отклонения от заданного профиля  $\Delta_k$  близки к расчетным и расхождение не превышает 40 мкм, что соответствует заданному качеству точности.

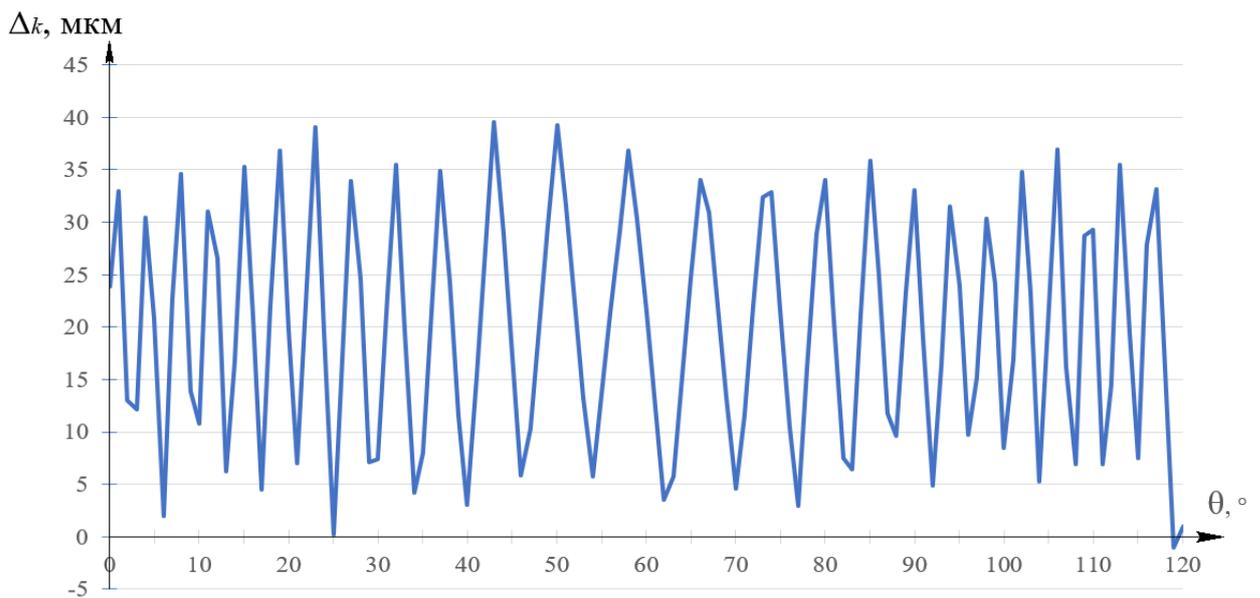


Рис. 4.9 График изменения отклонений от заданной формы поверхности  $\Delta_k$

Можно сделать вывод что спроектированный и изготовленный прототип фрезы-протяжки обеспечивает обработку с заданной точностью по отклонению формы поверхности.

#### 4.4 Выводы

1. Разработан, смоделирован и изготовлен прототип фрезы-протяжки со средним радиусом  $R_f = 100$  мм и числом зубьев  $Z = 25$ , с устройством настройки зубьев на размер.

2. Создана экспериментальная установка на базе токарного станка 1К62 с применением дополнительного привода для заготовки для проведения опытной обработки РК-профильных ступеней.

3. Проведена обработка опытных образцов деталей с РК-профилем из заготовок из стали и алюминия со следующими режимами обработки: частота оборотов шпинделя станка –  $n_f = 120$  об/мин; частота вращения детали –  $n = 40$  об/мин; максимальная скорость резания –  $v = 87,6$  м/мин; осевая подача – 0,2 мм на оборот фрезы.

4. Проведенные измерения на автоматизированном стенде показали, что отклонения от идеальной поверхности РК-профиля находятся в пределах рассчитанных значений  $\Delta_k = 40$  мкм.

## Глава 5. Моделирование конструкции сборной фрезы-протяжки

### 5.1 Выбор варианта конструкции сборной фрезы-протяжки

Выбор оптимальной конструкции инструмента является важной составляющей технологической подготовки производства. Проектирование нового специального металлорежущего инструмента должно быть оправдано с экономической точки зрения и приводить к повышению производительности обработки [9, 40, 59].

В настоящее время широко применяются сборные инструменты разнообразных конструкций, оснащенные СМП. Такие конструкции обладают рядом достоинств:

- снижение затрат на материал корпуса инструмента благодаря многократному использованию корпуса фрезы в отличие от инструмента цельного и с напайными пластинами, у которых корпус после выработки идет на переплавку;
- отсутствие необходимости в операциях переточки устраняет возможность возникновения внутренних напряжений. При предельном износе пластину поворачивают, либо заменяют при износе всех сторон;
- повышение прочности режущих кромок и периода стойкости фрезы ввиду отсутствия внутренних напряжений и, как следствие, появления трещин, возникающих при пайке в твердом сплаве режущей части;
- повышение надежности и долговечности инструмента, вследствие применения опорных поверхностей под пластиной с высокой твердостью;
- повышение стабильности режущих свойств – оптимизированная геометрия пластины обеспечивает прочную режущую кромку что повышает эффективность использования мощности.

Улучшение и оптимизация механизмов крепления пластин упрощает операции с ними и сокращает вспомогательное время за счет исключения операций настройки и наладки на станке.

Методы проектирования сборного инструмента в основном сводятся к созданию моделей и алгоритмов, описывающих как его конструкцию, так и сам процесс резания [60]. При этом концептуально конструкция проектируемого инструмента во многом определяется следующими проектно-конструкторскими решениями:

- формирование схемы срезания припуска СМП инструмента;
- выбор варианта схемы крепления СМП в корпусе инструмента;
- определения конструкции корпуса инструмента.

## **5.2 Анализ схем вариантов крепления сменных многогранных пластин**

Обзор существующих методов проектирования сборного металлорежущего инструмента позволяет представить процесс проектирования в виде схемы состоящей из определенных проектных процедур (рис. 5.1) [11, 19, 21, 26, 58, 59, 64].

Исходные данные для проектирования представляют собой:

- геометрические параметры обрабатываемой поверхности детали и поверхности заготовки;
- параметры оценки вариантов проектных решений, которые будут учитываться при анализе результатов проектирования и выбора соответствующих ограничений, накладываемых на эти параметры - области допустимых решений. В том числе:
  - характеристики обрабатываемой поверхности по точности: размерной, параметров шероховатости и погрешности профиля;
  - характеристики физических процессов, протекающих при резании (период стойкости СМП, равномерность износа и пр.);
  - характеристики, относящиеся к габаритным размерам проектируемого инструмента (для фрез наиболее актуальны габариты, а именно наружный диаметр).

Вопросы математического описания номинальной поверхности детали и заготовки, а также производящей поверхности проектируемого инструмента были подробно рассмотрены в главе 2 настоящего исследования.

При проектировании сборного инструмента одной из основных задач является определение баз крепления СМП в корпусе, обеспечивающих массивом формообразующих точек режущих кромок СМП дискретное представление производящей поверхности, при котором достигаются наилучшие условия формообразования [60].

При проектировании фрезы были рассмотрены основные схемы крепления СМП, которые используются, в конструкциях сборных фрез [25, 58, 59, 60]. В наиболее распространенных конструкциях сборных фрез используются пять основных конструктивных решений (схем) узла крепления СМП [47]:

1. Клиновое крепление СМП со стороны передней поверхности (рис. 5.1);
2. Клиновое крепление СМП со стороны основной опорной поверхности (рис. 5.2);
3. Крепление винтом через центральное отверстие с радиальным расположением СМП (рис. 5.3, а) и с тангенциальным расположением СМП (рис. 5.3, б);
4. Крепление косой тягой через центральное отверстие с тангенциальным расположением СМП (рис. 5.4);
5. Крепление СМП прихватом (рис. 5.5).

Варианты крепления, изображённые на рис. 5.2 и 5.3, зачастую выпускаются с базированием СМП непосредственно на корпус без промежуточного элемента – подкладки.

Для всех конструкций дисковых фрез, кроме варианта, изображённого на рис. 5.3, б, и дисковых фрез Heinlein, предусматривается возможность осевого регулирования фрезы для устранения торцевого биения или настройки на определённый размер обрабатываемого паза. В конструкциях фрез фирм «Krupp Widia» (Германия), «Metallwerk Plansee» (Австрия), «Ingersol» (США) и

«Hertel» (Германия) для регулирования размера фрезы по ширине предусмотрено специальное устройство [101].

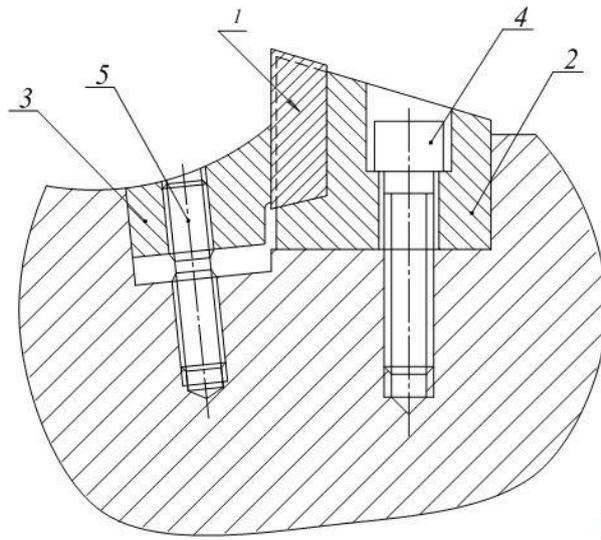


Рис. 5.1. Клиновое крепление СМП со стороны передней поверхности [47]  
 1 – СМП; 2 – подкладка; 3 – клин крепления СМП; 4 – винт крепления подкладки; 5 – винт клина

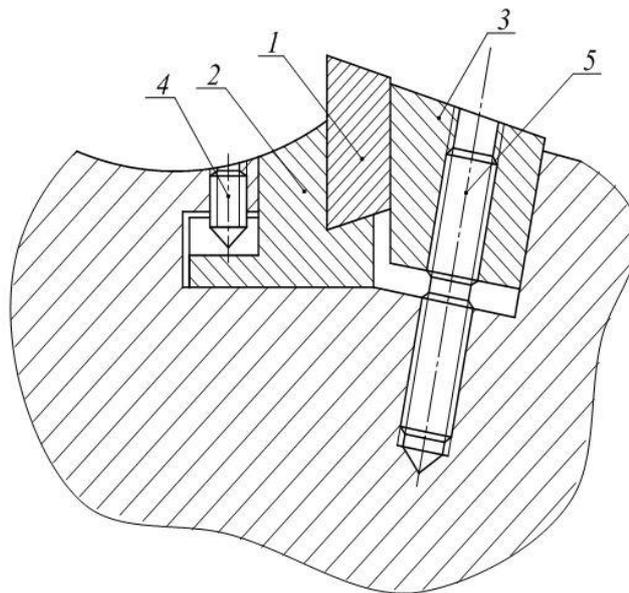


Рис. 5.2. Клиновое крепление СМП со стороны основной опорной поверхности [47]

1 – СМП; 2 – подкладка; 3 – клин крепления СМП; 4 – винты крепления подкладки и регулирования размера по ширине; 5 – винт клина

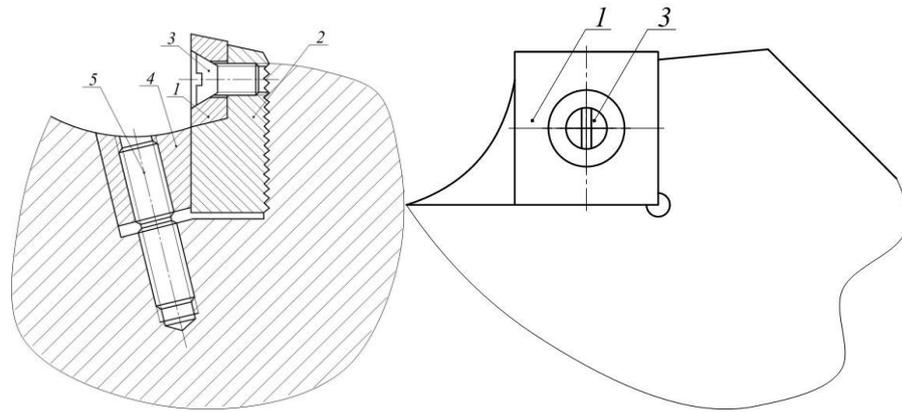


Рис. 5.3 Крепление винтом через центральное отверстие [47]

а – с радиальным расположением СМП; б – с тангенциальным расположением:

СМП: 1 – СМП; 2 – подкладка; 3 – винт крепления СМП; 4 – клин крепления подкладки; 5 – винт клина

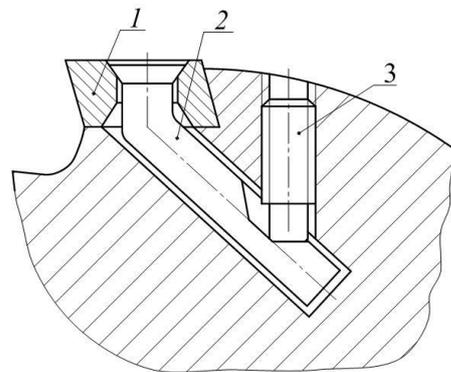


Рис. 5.4. Крепление косо́й тягой с тангенциальным расположением СМП [47]

1 – СМП; 2 – тяга (фиксирующий палец); 3 – винт тяги

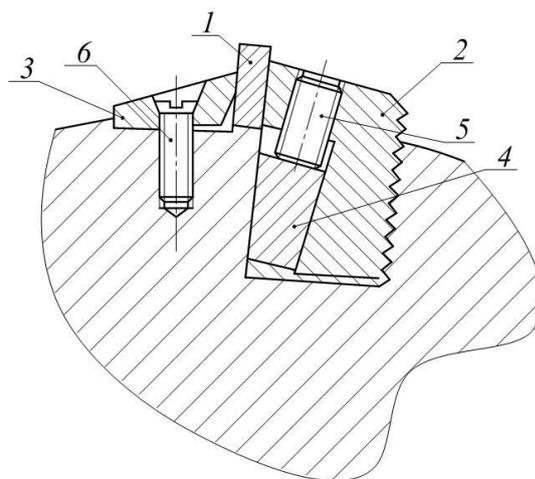


Рисунок 5.5. Крепление СМП прихватом [47]

1 – СМП; 2 – подкладка; 3 – прихват; 4 – клин крепления подкладки; 5 – винт клина; 6 – винт прихвата

Узлы крепления СМП у фрез различных конструкций имеют конструктивные отличия, различаются количеством деталей и размерами. При этом с точки зрения удобства эксплуатации, преимущество имеют конструкции с наличием элементов между корпусом и СМП (см. рис. 5.1–5.3), которые защищают корпус от повреждений при внезапной поломке СМП в процессе резания [47].

Ввод дополнительных деталей в узел крепления, и соответственно, создание размерных цепей требует повышения точности исполнения размеров корпуса, усложняет структуру упругой системы фрезы. Использование устройств регулирования размера по вылету также добавляет элементы, усложняющих расчётную схему устройства [101].

Анализ схем крепления СМП позволяет выявить и идентифицировать их основные элементы для выбора оптимальной схем крепления СМП.

Проведем анализ конструкции крепления СМП по следующим критериям:

- компактность конструкции;
- минимальное количество элементов;
- соответствие конструкции крепления выбранной пластины.

Наиболее рациональной конструкцией в нашем случае будет крепление по варианту на рис. 5.1. С целью сокращения высоты конструкции применим клиновое крепление подкладки.

### **5.3 Определение основных параметров проектируемой фрезы**

Исследование зависимости конструктивных параметров, влияющих на качество обрабатываемой поверхности и период стойкости СМП привело к выводу, что увеличение количества СМП приводит к улучшению как точностных, так и стойкостных характеристик [48, 49, 55]. Ввиду ограничения размеров зоны оборудования, невозможно применение фрезы больше определенного диа-

метра, а конструкция крепления СМП ограничивает минимальный угол расположения при данном диаметре фрезы (рис. 5.6).

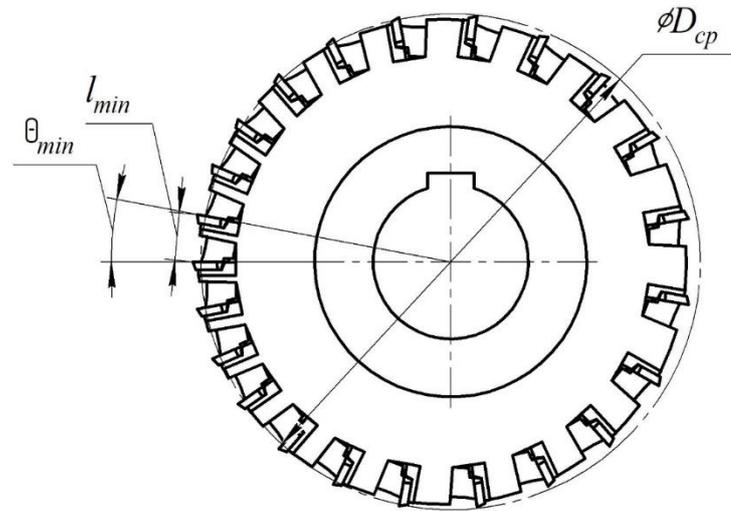


Рис. 5.6 Основные конструктивные параметры фрезы с числом зубьев  $Z = 25$  с переменным шагом расположения СМП

По технологическим ограничениям проектируемая фреза должна удовлетворять следующим условиям:

$$D_{min} \geq D_{cp} + 2e \leq D_{max}, \quad (5.1)$$

где  $D_{cp}$  – средний диаметр фрезы;

$D_{max}$  – предельно допустимый диаметр фрезы, ограниченный габаритами рабочей зоны оборудования;

$D_{min}$  – минимальный диаметр фрезы при данном количестве СМП.

Минимальный диаметр зависит от количества СМП и конструкции их крепления:

$$D_{min} \geq \frac{l_{min}}{\sin \frac{\theta_{min}}{2}}, \quad (5.2)$$

$\theta_{min}$  – минимальный угловой шаг расположения СМП;

$l_{min}$  – минимально допустимое расстояние между СМП для выбранного способа крепления исходя из условий жесткости корпуса фрезы.

Задачу определения конструктивных параметров фрезы следует решать комплексно, с выполнением следующих условий:

- количество СМП должно быть минимально необходимым для достижения заданной точности формы [48];
- период стойкости фрезы, равный минимальному периоду стойкости СМП должен быть не менее требуемых значений [49];
- коэффициент неравномерности периода стойкости СМП должен быть минимален для снижения эксплуатационных издержек и повышения срока службы инструмента;
- диаметр инструмента при заданном количестве СМП должен быть минимальным исходя из условий жесткости корпуса фрезы и выбранной схемы крепления СМП.

Решение вышеуказанной задачи позволит спроектировать работоспособную конструкцию фрезы с заданными параметрами качества обработки и стойкости.

#### **5.4 Выбор типовой конструкции фрезы-протяжки оснащенной СМП**

Рассмотрим наиболее распространенные конструкции фрез, оснащенных СМП для определения облика проектируемой фрезы.

Следует заметить, что в связи с особенностями формообразования по схеме, приведенной на рисунке 1.2, тип проектируемой фрезы представляет собой промежуточный вариант между дисковой двусторонней и торцевой фрезой.

На рисунке 5.7 показана фреза фирмы DORMER PRAMET TOOLS. Подобное крепление достаточно компактно, но отсутствие подкладки и базирующих поверхностей для пластины в осевом направлении усложняет сборку и настройку инструмента. Поверхности для схода стружки выполнены по периферии фрезы, тогда как в нашем случае – сход стружки идет по торцу фрезы.

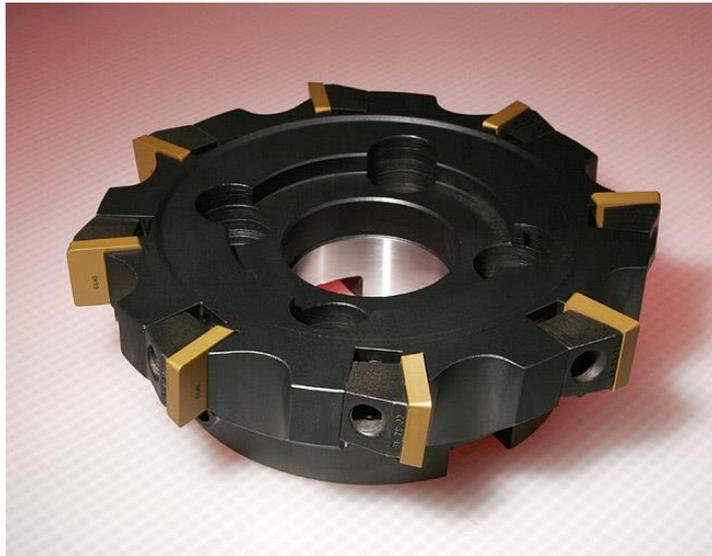


Рис. 5.7 Торцовая фреза с креплением клином по основанию пластины

На рис. 5.8 показана торцовая фреза фирмы «KorLOY» с креплением пластины на подкладке и зажимом клином по опорной поверхности пластины.

Устройство крепления более практично и обеспечивает базирование пластины по трем плоскостям, но подкладка с крепление сложна по конфигурации и изготовлению.



Рис. 5.8 Торцовая фреза с креплением на подкладке клином,  
со стороны опорной поверхности

Существует вариант крепления пластины и базирующей подкладки с помощью параллельно установленных клиньев (см. рисунок 5.9).



Рис. 5.9 Торцовая фреза с креплением пластины и базирующей подкладки с помощью параллельно установленных клиньев

Комбинация вариантов на рис. 5.8 и 5.9 может быть использована для построения варианта крепления проектируемой фрезы.

### **5.5 Определение положение в пространстве элементов крепления конструкции пластин и трехмерное моделирование фрезы-протяжки.**

Для точной ориентации в пространстве необходимо определить положение каждого элемента крепления СМП. Поскольку ранее мы определили положение СМП относительно производящей поверхности, положение остальных элементов определяем относительно системы координат [25, 59].

Выявленные взаимосвязи между элементами схем крепления СМП позволяют сформировать систему их конструкторских параметров. Формирование системы будем осуществлять поэлементно:

1. Определение положения прокладки.

Расчетная схема представлена на рисунке 5.10:

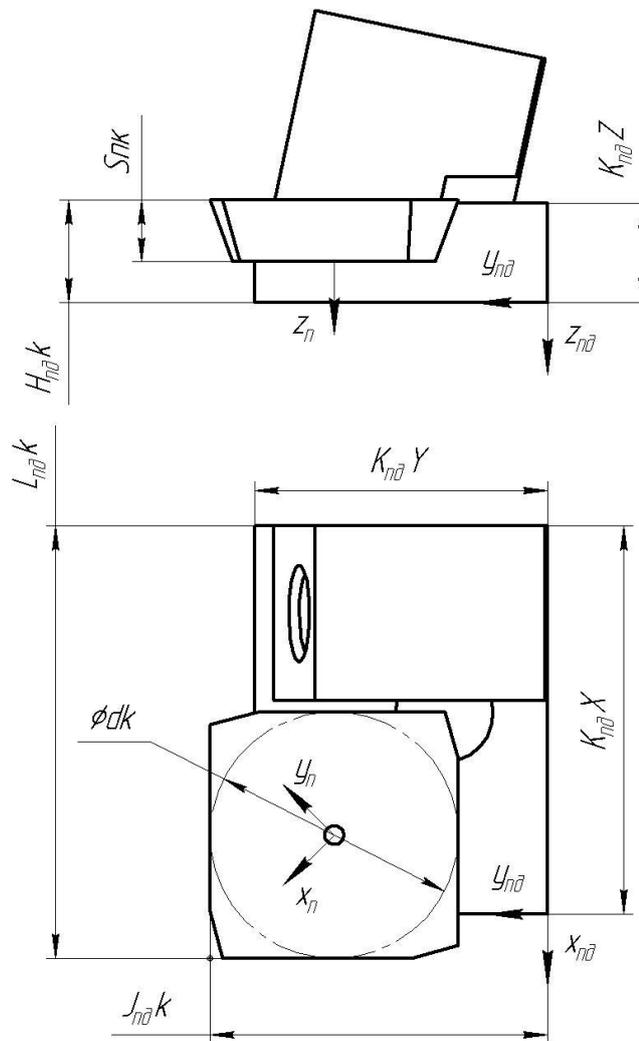


Рис. 5.10 Расчетная схема установки подкладки в системе координат пластины.

Параметры матрицы установки подкладки (рис. 5.14) относительно  $kr$ -й СМП рассчитаем, как результат перемножения матриц обобщенных переменных (приложение 1) с соответствующими параметрами:

$$M_{pd} = A^6(-n_{пл}) \cdot A^1\left(\frac{d_k}{2} - L_{пд}k + K_{пд}X\right) \cdot A^2\left(-J_{пд} + \frac{d_k}{2}\right) \times \quad (5.1)$$

$$\times A^3(H_{пд}K - S_{пк}).$$

## 2. Определение положения клина 1

Расчетная схема представлена на рисунке 5.11:

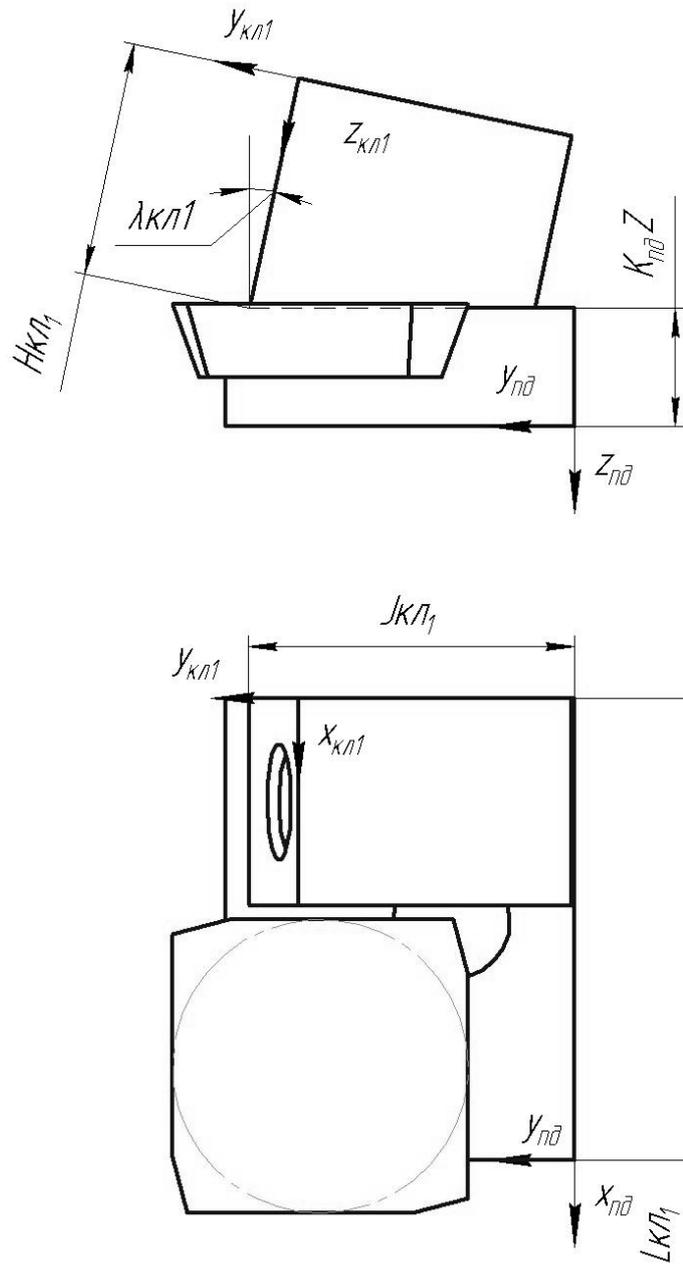


Рис. 5.11 Расчетная схема установки клина 1 в системе координат прокладки.

Положение клина 1 определим относительно системы координат прокладки:

$$M_{кл1} = A^1(-L_{кл1}) \cdot A^2(J_{кл1}) \cdot A^3(-K_{пд}Z) \cdot A^4(-\lambda_{кл1}) \cdot A^3(H_{кл1}). \quad (5.2)$$

### 3. Определение положение клина 2.

Расчетная схема представлена на рисунке 5.12

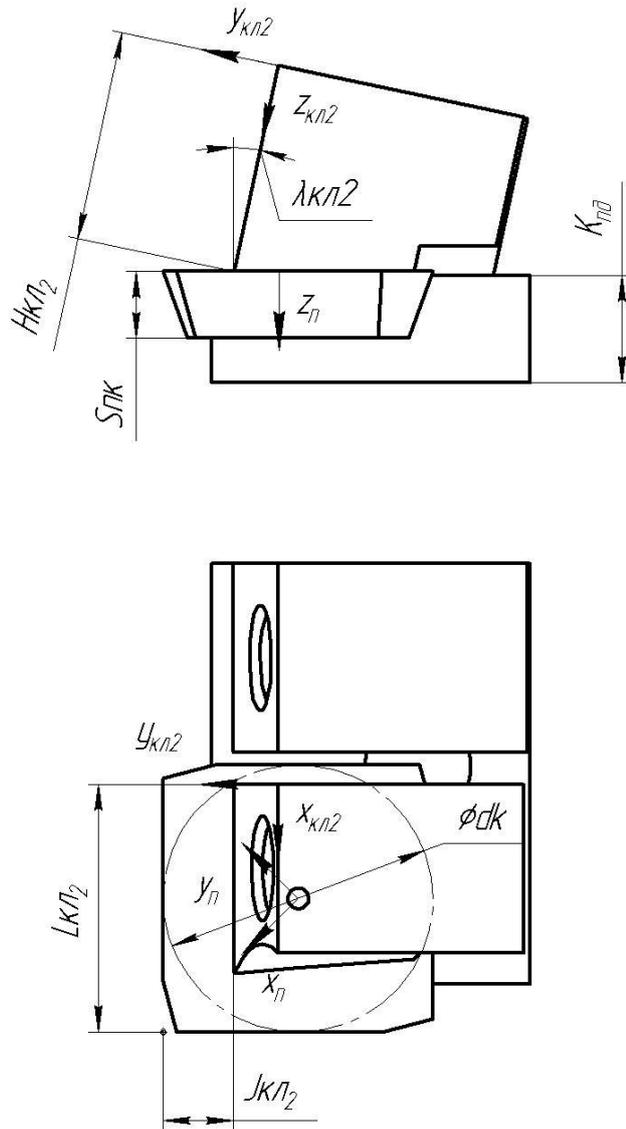


Рис. 5.12 Расчетная схема установки клина 2 в системе координат пластины.

Положение клина 2 определяем относительно системы координат пластины:

$$M_{кЛ2} = A^6(-n_{пл}) \cdot A^1\left(-L_{кЛ2} + \frac{dk}{2}\right) \cdot A^2\left(\frac{dk}{2} - J_{кЛ2}\right) \cdot A^3(-S_{ПК}) \cdot A^4(-\lambda_{кЛ2}) \cdot A^3(H_{кЛ2}). \quad (5.3)$$

Полученные зависимости позволяют, используя программное обеспечение выполнить построение трехмерной модели фрезы по заданным параметрам.

На рисунке 5.13 показаны основные элементы конструкции крепления СМП.

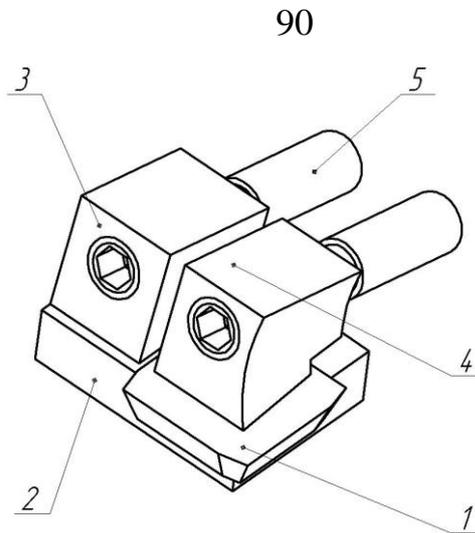


Рис. 5.13. Основные элементы конструкции крепления СМП:

*1 – пластина; 2 – подкладка; 3 – клин 1; 4 – клин 2; 5 – дифференциальный винт (2 шт.)*

Используя известные параметры и структуру конструкции, выполняем трехмерное моделирование конструкции в среде «КОМПАС-3D» (см. рисунок 5.14).

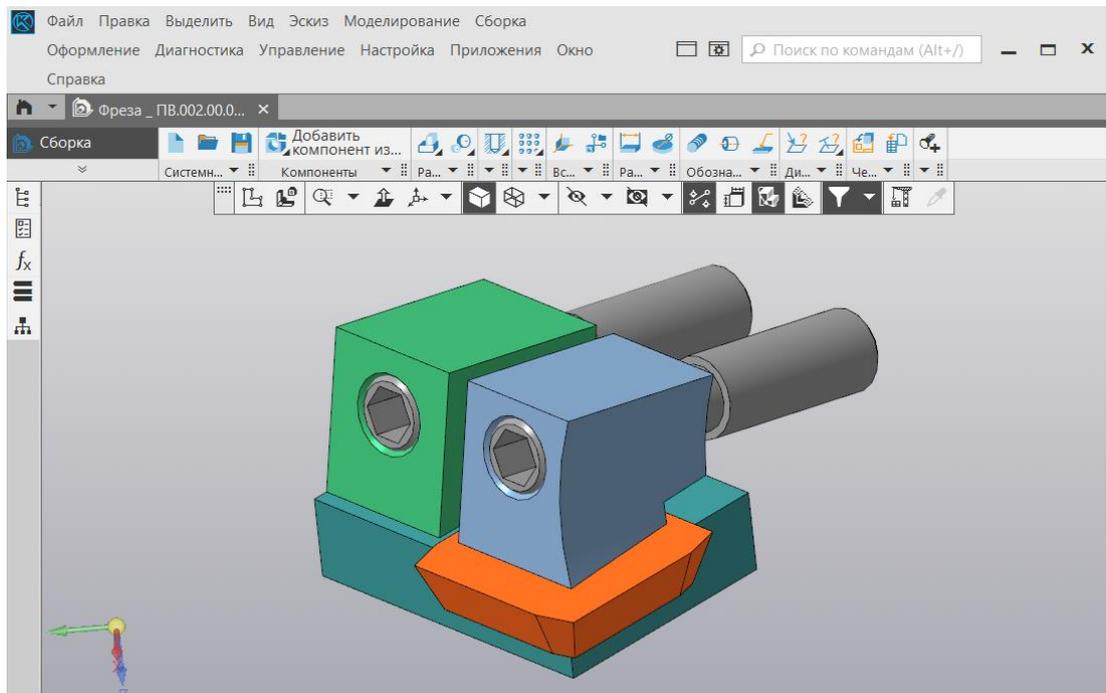


Рис. 5.14 3D-модель конструкции крепления СМП-пластины

Сочетая возможности трехмерного моделирования и математического программирования, позволяет построить точные модели конструкции фрезы.

Пример выполненного построения показан на рисунке 5.15.

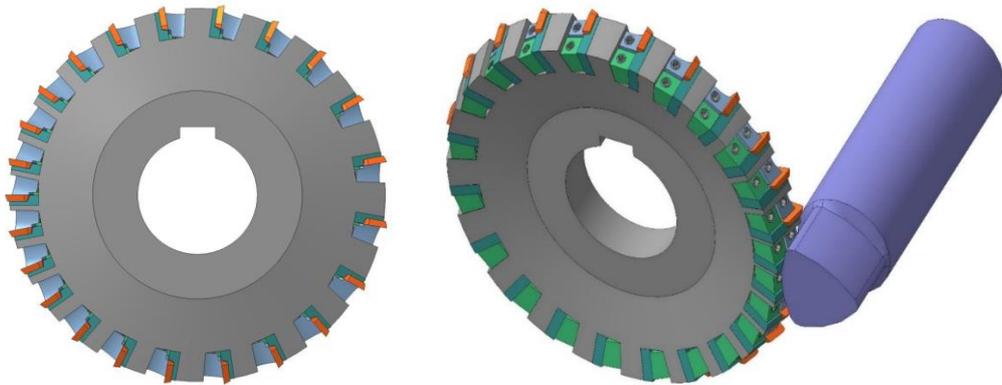
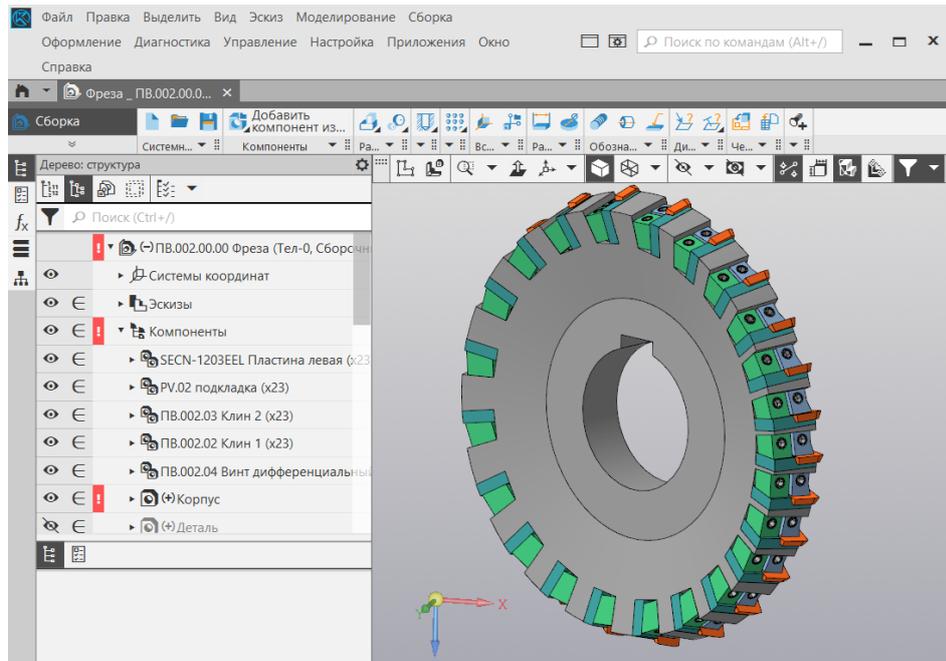


Рис. 5.15 Построение 3D модели сборной фрезы

Выполненные трехмерные модели элементов конструкции фрезы-протяжки могут использоваться для расчетов на прочность в специальных приложениях и для изготовления на оборудовании с ЧПУ.

## 5.6 Выводы

1. Осуществлен выбор варианта конструкции сборной фрезы-протяжки на основе проектно-конструкторских решений .
2. Рассмотрены наиболее часто применимые схемы крепления сменных многогранных пластин и выполнен выбор конструкции с подложкой и двумя клиньями как наиболее компактный для данной фрезы-протяжки.

3. Определены основные предельные размеры проектируемой фрезы исходя из размеров рабочей зоны оборудования, количества СМП и конструкции их крепления.

4. Определено положение элементов крепления конструкции пластин в пространстве в соответствии с расчетными схемами расположения.

5. Выполнено трехмерное моделирование конструкции фрезы-протяжки в среде «КОМПАС-3D»

## Заключение

В диссертации содержится решение научной задачи создания нового производительного и эффективного способа обработки РК-профильных ступеней валов при крупносерийном и массовом производстве основанного на идее применения фрезы-протяжки с осевой подачей и метода проектирования подобного инструмента

В процессе теоретического и экспериментального исследования сделаны выводы и получены следующие результаты:

1. Разработан новый способ обработки РК-профильных ступеней специальной дисковой фрезой-протяжкой (Патент № 2728269) с осевой подачей инструмента. В работе доказано, что применение данного способа возможно с применением модернизированных универсальных токарных станках, обеспечивающих отношение частоты вращения инструмента к частоте вращения детали кратным числу сторон РК-профиля.

2. Выполненные, с использованием разработанных методов расчета, теоретические исследования процесса формообразования позволили установить непостоянство величины погрешности вдоль профиля обработанного вала при равномерном шаге расположения режущих зубьев фрезы-протяжки (до 90%), что позволило обосновать целесообразность установки режущих зубьев с переменным шагом расположения. Выполненные для профильного вала  $R = 40$  мм и  $e = 3,4$  мм, с применением разработанного алгоритма и программного обеспечения (Свидетельство № 2020611659), расчеты позволили установить соответствующие числа зубьев и угловые шаги режущих зубьев обеспечивающих равномерность погрешности формообразования для квалитетов точности обработки с 8 до 12 при средних диаметрах фрез-протяжек от 100 до 400 мм.

3. Применение разработанной методики расчета периода стойкости зубьев фрезы, с учетом переменных параметров обработки: подачи на зуб; глубины резания; ширины фрезерования; приведенного числа зубьев фрезы-протяжки; скорости резания и диаметра инструмента позволили расчетным путем устано-

вить неравномерность периода стойкости зубьев фрезы. Для оценки неравномерности периода стойкости СМП был предложен коэффициент неравномерности периода стойкости равный отношению размаха значений периода стойкости зубьев фрезы протяжки к величине наибольшего периода стойкости зубьев. Расчет коэффициента неравномерности показал, что при постоянном угловом шаге режущих зубьев для определенных конструкций фрез-протяжек его значение составило 0,64. Использование конструкций фрез-протяжек с переменным угловым шагом переменном позволил снизить это значение до 0,28, а также повысить период общей стойкости инструмента более чем на 25% при одинаковых режимах обработки.

4. Предложено, для снижения коэффициента неравномерности периода стойкости СМП при неравномерном угловом шаге расположения режущих зубьев, устанавливать дополнительные режущие зубья на участках фрезы-протяжки, где зубья характеризуются низкими показателями стойкости (обрабатываемые впадины РК-профильного вала). Применение разработанной методики и алгоритма корректировки положения зубьев при их добавлении позволило снизить значение коэффициента неравномерности периода стойкости зубьев на 28,5%.

5. На основе компьютерного моделирования процесса обработки РК-профильного вала с размерами  $R = 40$  мм и  $e = 3,4$  мм фрезой-протяжкой со средним диаметром равным 200 мм, постоянным и переменным угловым шагом расположения режущих зубьев, выполненного в среде в специализированном инженерном программном комплексе DEFORM 3D, установлено, что применение неравномерного шага расположения режущих зубьев позволяет снизить амплитуду крутящего момента на  $15 \div 55\%$  и получить более стабильные силовые параметры резания, положительно влияющие на качество и точность обработанной поверхности и на снижение вибронагруженности инструмента.

6. С учетом выявленных особенностей и закономерностей процесса обработки РК-профиля был разработан алгоритм расчета основных конструктивных параметров сборной фрезы-протяжки, оснащенной сменными многогранными

пластинами, а именно: среднего радиуса фрезы-протяжки; требуемого количества зубьев для достижения заданной точности поверхности; углов расположения зубьев; частот вращения инструмента и заготовки.

7. Разработанный и изготовленный с применением созданного алгоритма прототип сборной фрезы-протяжки средним радиусом  $R_f = 100$  мм и  $Z = 25$  зубьями для обработки РК-профиля с параметрами  $R = 40$  мм и  $e = 3,4$  мм по результатам натурных испытаний позволили получить качество обработанной поверхности по параметру отклонения от заданного профиля отличающуюся от расчетных значений не более чем на 40 мкм.

8. Результаты проведенных исследований приняты к промышленному применению на предприятиях АО «Геомаш» г. Щигры, АО «Энерготекс» г. Курчатова, ООО «Комплект» г. Курск.

Научные и практические результаты диссертации рекомендуется применять при технологической подготовке производства валов с наружными РК-профильными ступенями в условиях крупносерийного производства.

Дальнейшие перспективы исследований связаны с разработкой и исследованием конструкции фрез протяжек для обработки криволинейных профилей различной геометрии.

**Список использованной литературы**

1. А.С. 931400 СССР М. Кл2 В 24 В 19/08 Устройство для обработки профильных валов и втулок с равноосным контуром// Р.Г. Гулмутминов, А.И. Тимченко // Опубликовано 30.05.82 Бюллетень №20.
2. А.С. 764250 СССР М. Кл2 В 24 В 1/00 Способ обработки профильных валов с равноосным контуром//А.И. Тимченко.
3. А.С. 891255 СССР М.Кл3 В23 С 3/08 Устройство для обработки валов с профилем «Равноосный контур»/А.Н Чекалов, А.И. Тимченко //Опубликовано 23.12.81 Бюллетень №47.
4. А.С. (СССР) Способ настройки станка для обработки РК- профильных поверхностей. Тимченко А.И., Лапин С.Н., Боголюбов А.В. В24В, 19/08, полож. Решение от 26.-9.92 г. по заявке 4890330/08 (118891) от 13.12.92.
5. А.С. 1599158 А1 СССР В 23 С 3/08, В 24 в 19/08 Способ обработки валов с профилем типа равноосный контур// А.И. Тимченко, А.Г. Схиртладзе // Опубликовано 15.10.90 Бюллетень №38.
6. Аналитическое описание режущих кромок сменных многогранных пластин сборных фасонных фрез / С. В. Ходыревская, А. А. Горохов, О. Г. Куц, Ю. А. Мальнева // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2017. – № 5(58). – С. 29-35.
7. Абросимова, М.А. Повышение точности формообразования сложных линейчатых поверхностей деталей двигателей инструментом в виде тела вращения на станках с ЧПУ [Текст] / М.А. Абросимова Дис. . к.т.н. Уфа. 1994г. – 158с.
8. Аверков, К. В. Токарная обработка крупногабаритных заготовок из жаропрочных сталей и сплавов вращающимся инструментом / К. В. Аверков, Д. Ю. Белан // Вестник машиностроения. – 2021. – № 1. – С. 74-77.
9. Аврутин С.В. Фрезерное дело Издательство «Высшая школа», Москва, 1963г. - 542 с.

10. Анурьев В.Н. Справочник конструктора машиностроителя. Изд. 4-е, Книга 1. М., «Машиностроение», стр. 1-416.

11. Борисов, С.В. Разработка фасонных концевых фрез с винтовыми стружечными канавками на криволинейной поверхности вращения [Текст] / С.В. Борисов Дис. ..к.т.н. Москва. 1998г. – 255 с.

12. Белов, Д.Б. Априорный анализ погрешностей изготовления фрез с винтовым затылованием вероятностными методами [Текст] / Д.Б. Белов. Дис. ..к.т.н. Тула. 2000г. – 173 с.

13. Борович Л.С. В24В 19/08, 1950. Заявка. Б.И.

14. Борович Л.С. Бесплоное соединение деталей машин. М. Машгиз1951г. 131 с.

15. Брусов, С.И. Повышение эффективности лезвийной обработки винтовых поверхностей на основе комплексного анализа параметров процесса [Текст] / С.И. Брусов. Дис. ..к.т.н. Орел. 2003г. – 181 с.

16. Брусов, С.И. Повышение эффективности обработки резанием. Коллективная монография. / С.И. Брусов, Г.И. Добровольский, Д.Ю. Дубров, В.П. Иванов, А.В. Катунин, А.В. Киричек, А.В. Морозова, О.В. Полохин, Т.М. Санина, Ю.А. Сергеев, В.А. Солодков, А.Е. Стешков, А.С. Тарапанов, Д.Е. Тарасов, А.В. Хандожко, О.М. Щебров; Под ред. А.В. Киричека -М.: Издательский дом «Спектр», 2012.-304 с. : ил.

17. Волков, А.Э. Повышение эффективности моделирования процессов формообразования и анализ работы конических и гипоидных зубчатых передач на стадии подготовки производства [Текст] / А.Э. Волков. Дис. ..д.т.н. Москва. 2001г. – 460 с.

18. Волковский, С.В. Повышение эффективности формообразования равноосноконтурных поверхностей по средством создания режущего инструмента реализующего метод огибания [Текст] / С.В. Волковский. Дис. .. к.т.н. Хабаровск. 2002г. – 218 с.

19. Гладышкин, А.О. Создание быстропереналаживаемых сборных фрез и технологии их применения для восстановления рельсового транспорта [Текст] / А.О. Гладышкин. Дис. ..к.т.н. Курск. 2009г. – 137 с.

20. Горохов, А.А. Методика проектирования и изготовления сборных дисковых фрез на основе математического моделирования [Текст] / А.А. Горохов. Дис. ..к.т.н. Курск. 2000г – 198 с.

21. Гречишников, В.А. Системы автоматизированного проектирования режущих инструментов [Текст] / В.А. Гречишников; М.: ВНИИТЭМР, 1987. – 52 с.

22. Грязев, М.В. Перспективные технологии обработки поверхностей вращения фрезерованием [Текст] / М.В. Грязев, А.В. Степаненко // Известия Тульского государственного университета. 2010. Вып.2. Ч.1 – С.130-136.

23. Гречишников, В.А. Поиск оптимальной конструкции фасонной фрезы [Текст] / В.А. Гречишников, А.П. Тарасов // Станки и инструмент. -1989. №7. с.15-17.

24. Емельянов, С.Г. Разработка теории, методов и средств формирования поверхностей сборными металлорежущими инструментами на основе системного моделирования процесса их проектирования [Текст] / С.Г. Емельянов. Дис. .. д.т.н. Москва. 2001г. – 407 с.

25. Емельянов С.Г., Куц В.В. Математическое моделирование сборных фасонных фрез: Монография/ Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 2008. 254 с.

26. Емельянов, С.Г. Корректировка положений сменных многогранных пластин при проектировании сборных дисковых фрез для обработки шеек колеччатых валов [Текст] / С.Г. Емельянов, В.В. Куц // СТИН, 2000, №2. – С. 12-15.

27. Емельянов, С.Г. Определение размеров остаточных слоев при фрезеровании сборными дисковыми фрезами [Текст] / С.Г. Емельянов, А.А. Горохов, В.В. Куц // В сборнике: Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве I Всероссийская научно-техническая конференция. 1999. С. 15-18.

28. Ермаков, Ю. М. Парадоксы классической стойкостной зависимости и выбор оптимальной скорости резания / Ю. М. Ермаков // Научные технологии в машиностроении. – 2014. – № 10(40). – С. 26-29.

29. Жихарев, Д.А. Повышение точности червячных фрез за счет совершенствования метода формирования поверхностей режущей части инструмента [Текст] / Д.А. Жихарев. Дис. ..к.т.н. Тула. 2009г. – 290 с.

30. Жуков, И.П. Технологическое и инструментальное обеспечение процесса формообразования червячных передач глобоидного типа новой геометрии [Текст] / И.П. Жуков. Дис. ..к.т.н. Санкт-Петербург. 2003 г. – 136 с.

31. Жуплов, М.В. Профилирование фрез для обработки винтовых поверхностей на основе построения схем формообразования [Текст] / М.В. Жуплов. Дис. ..к.т.н. Орел. 2009г. – 207 с.

32. Захаров, О.В. Геометро-кинетический и гармонический синтез бесцентрового суперфинишного формообразования [Текст] / О.В. Захаров. Дис. ..к.т.н. Саратов. 2001г. – 201 с.

33. Зенин, Н.В. Технологическое обеспечение качества трехгранного профиля бесшпоночных соединений в условиях серийного производства [Текст] / Н.В. Зенин. Дис. ..к.т.н. Москва. 2007г. – 132 с.

34. Илюхин, С.Ю. Каркасно-кинематический метод моделирования формообразования поверхностей деталей машин дисковым инструментом [Текст] / С.Ю. Илюхин. Дис. ..д.т.н. Тула. 2002г. – 390 с.

35. Истоцкий, В.В., Формирование режущей части фасонных борфрез с применением шлифовально-заточных станков с ЧПУ [Текст] / В.В. Истоцкий. Дис. ..к.т.н. Тула. 2005г. – 124 с.

36. Ковтун, Д.А. Нахождение высокопроизводительного процесса формообразования РК-профильных отверстий, основанного на одном движении по окружности [Текст] / Д.А. Ковтун. Дис. ..к.т.н. Москва. 1999г. – 100 с.

37. Козлов, А.М. Разработка инструмента с некруговой рабочей поверхностью для повышения эксплуатационных характеристик прокатных валков при их шлифовании [Текст] / А.М. Козлов. Дис. ..д.т.н. Москва. 2005г. – 394 с.

38. Колупаева, В. А. Обработка валов с РК-профильными ступенями специальным инструментом - фрезой-протяжкой с заданной точностью / В. А. Колупаева // Перспективное развитие науки, техники и технологий : сборник научных статей 12-ой Международной научно-практической конференции, Курск, 01 ноября 2022 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2022. – С. 175-181.

39. Косилова, А.Г. Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. С 74 Т. 2/Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е издание, перераб и доп. – М.: Машиностроение , 1985, С. – 496.

40. Кудевицкий Я.В. Фасонные фрезы. Л.: Машиностроение. Ленинградское отд-ние, 1978. – 176 с.

41. Кузьменко А.П., Моделирование режущих кромок дисковой фрезы с переменным радиусом предназначенной для обработки РК-профильных валов [Текст] / А.П. Кузьменко, В.В. Куц, Ю. А. Максименко // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012, №1(40).ч.1. – С.116-120.

42. Кузьменко, А. П. Построение модели режущих кромок дисковой фрезы для обработки валов с равноосным контуром / А. П. Кузьменко, В. В. Куц, Ю. А. Максименко // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 1-1(40). – С. 116а-120.

43. Курин, А.А. Стойкостные исследования червячно-модульных фрез с вершиной зуба, очерченной по дуге окружности [Текст] / А.А. Курин. Дис. ..к.т.н. Волгоград. 2000г. – 238 с.

44. Куц, В. В. Построение модели формообразования длинных валов с РК - профилем сборной дисковой фрезой / В. В. Куц, В. В. Пономарев // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2017. – № 2(322). – С. 110-115.

45. Куц, В. В. Исследование изменения крутящего момента при обработке РК-профиля фрезой-протяжкой / В. В. Куц, В. В. Пономарев, Д. А. Зубков // Качество продукции: контроль, управление, повышение, планирование : сборник научных трудов 8-й Международной молодежной научно-практической

конференции, Курск, 12 ноября 2021 года. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 176-181.

46. Куц, В.В. Исследование влияния расположения зубьев фрезы-протяжки на показатели процесса обработки/ В.В. Куц, В. В. Пономарев // Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении : III Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием, Тула, 06–08 апреля 2022 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2022. – С. 110-114.

47. Емельянов, С. Г. Математическое моделирование сборных фасонных фрез / С. Г. Емельянов, В. В. Куц. – Курск : Курский государственный технический университет, 2008. – 254 с.

48. Куц, В. В. Метод определения положения зубьев сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей / В. В. Куц, В. В. Пономарев // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2017. – Т. 13. – № 6. – С. 81-85.

49. Куц, В. В. Моделирование и исследование стойкостных характеристик сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей при обработке протяженных РК-профильных валов / В. В. Куц, В. В. Пономарев // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2020. – Т. 24. – № 1. – С. 23-34.

50. Куц В.В. Обработка валов с РК-профильными ступенями фрезой-протяжкой с осевой подачей инструмента/ В.В. Куц, В.В. Пономарев // Машиностроительные технологические системы : Международная научно-техническая конференция, Ростов-на-Дону, 26–29 мая 2022 года. - Ростов-на-Дону, Донской государственный технический университет, 2022. – С. 271-278.

51. Куц, В.В. Предварительная обработка валов с РК-профильными ступенями фрезой-протяжкой с осевой подачей инструмента/ В.В. Куц, В.В. Пономарев, В.В. Сидорова // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: 14-я Международная научно-техническая конференция, посвященная 50-летию Брянской научной

школы технологов-машиностроителей, Брянск 5-7 октября 2022 года. – Брянск, 2022. С. 128-134.

52. Куц, В.В. Применение фрезы-протяжки для обработки валов с РК-профильными ступенями с осевой подачей инструмента/ В.В. Куц, В.В. Пономарев // Прогрессивные технологии и процессы : 9-я Всероссийская научно-технической конференции с международным участием, Курск, 22-23 сентября 2022 года. – Курск, 2022. С. 162-169.

53. Куц, В.В. Синтез производящих поверхностей фрез-протяжек для обработки валов с равноосным контуром [Текст] / В.В. Куц, А.Г. Ивахненко, М.Л. Сторублев // Известия Тульского государственного университета. 2012, Вып.8 – С.42-48.

54. Куц В.В., Моделирование расчета геометрических параметров срезанного слоя фрезой дисковой с переменным радиусом для обработки валов с равноосным контуром [Текст] / В.В. Куц, Ю.А. Максименко // Сборник научных статей V Международной научно-технической конференции 22-24 мая 2013 года «Машиностроение –основа технологического развития России», 2013 – С211-216.

55. Куц, В. В. Метод расчета геометрических параметров фрезы с радиальной конструктивной подачей для осевого фрезерования РК-профильных валов / В. В. Куц, В. В. Пономарев // Обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической техники : материалы Международной научно-технической конференции, Брянск, 19–20 февраля 2020 года / Брянский государственный технический университет. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2020. – С. 243-249.

56. Куц, В. В. Обзор существующих методов обработки РК-профильных отверстий / В. В. Куц, Ю. А. Мальнева, М. В. Митрофанов // Молодежь и наука: шаг к успеху : Сборник научных статей 5-й Всероссийской научной конференции перспективных разработок молодых ученых. В 4-х томах, Курск, 22–23 марта 2021 года / Отв. редактор М.С. Разумов. Том 4. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2021. – С. 188-192.

57. Куц В.В., Оценка величины подачи на зуб при моделировании процесса фрезерования валов с равноосным контуром [Текст] / В.В. Куц, Ю.А. Максименко // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации, 10-я международная научно-техническая конференция, 19-22 марта 2013г.

58. Куц, В.В. Повышение эффективности расчета сборных дисковых фрез для обработки шеек коленчатых валов на основе компьютерно-ориентированного моделирования [Текст] / В.В. Куц. Дис. ..к.т.н. Москва. 2000г. – 194с.

59. Куц, В.В. Методология предпроектных исследований специализированных металлорежущих систем [Текст] / В.В. Куц. Дис. ..д.т.н. Курск. 2012г. – 366с.

60. Куц, В. В. Структурный синтез специализированных металлорежущих систем для обработки РК-профильных валов / В. В. Куц, Ю. А. Максименко // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 6(45). – С. 065-070.

61. Куц, В.В. Способы обработки профильных валов фрезами с радиальной конструктивной подачей [Текст] / В.В. Куц, Ю.А. Мальнева, А.А. Горохов // В сборнике: Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения материалы Международной научно-технической конференции – 2015. – С. 156-158.

62. Куц. В.В. Снижение величины неравномерности стойкости зубьев сборной фрезы-протяжки при осевом фрезеровании РК-профильных валов / В.В. Куц, В.В. Пономарев // Известия тульского государственного университета. Технические науки. 2021. № 5. С. 382-388.

63. Куц, О. Г. Синтез вариантов схем установки сменных многогранных пластин относительно профиля производящей поверхности фасонных фрез / О. Г. Куц, А. А. Горохов // Прогрессивные технологии и процессы : Сборник научных статей 2-й Международной молодежной научно-практической конференции в 3-х томах, Курск, 24–25 сентября 2015 года / Ответственный редактор:

Горохов А.А.. Том 2. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2015. – С. 122-130.

64. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: Монография/ Курск. гос. техн. ун-т. Курск, 1997. 391 с.

65. Лоладзе, Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента [Текст] / Т.Н. Лоладзе. М.: Машиностроение, 1982. - 320 с.

66. Максименко, Ю. А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем : специальность 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Максименко Юлия Андреевна. – Курск, 2014. – 135 с.

67. Максименко Ю.А., Анализ существующих методов проектирования приспособлений для фрезерных станков [Текст] / Ю.А. Максименко // Инновации, качество и сервис в технике и технологиях, 19-21 мая 2011 года, г. Курск. – С 356.

68. Максименко Ю.А., Моделирование различных конструктивных исполнений режущих кромок фрезы с переменным радиусом для обработки валов с равноосным контуром [Текст] / Ю.А. Максименко, В.В. Куц // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых, Материалы молодежной научной конференции, 14-20 ноября 2012 г.

69. Максименко Ю.А., Методика расчета геометрических параметров остаточных слоев фрезой дисковой с переменным радиусом при обработке РК-профильных валов [Текст] / Ю.А. Максименко, В.В. Куц // Фундаментальные проблемы техники и технологии, №3 -2(299) 2013, 19 апреля 2013года, г. Орёл. – С 55.

70. Мальнева, Ю. А. Новый способ обработки валов с равноосным контуром дисковой фрезой с радиальной конструктивной подачей / Ю. А. Мальнева, В. В. Куц, А. А. Горохов // Молодежь и XXI век - 2015 : материалы V Между-

народной молодежной научной конференции: в 3-х томах, Курск, 26–27 февраля 2015 года / Ответственный редактор: Горохов А.А.. Том 3. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2015.

71. Мехта Н.К. «Исследование стойкости твердосплавных торцовых фрез с учетом; параметров спектра колебаний системы СПИД». Автореферат к.т.н. М.т УДН, 1979, 15 с.

72. Патент № 2728269 С1 Российская Федерация, МПК В23С 5/06. Фреза дисковая для обработки валов с РК-профилем : № 2019136201 : заявл. 12.11.2019 : опубл. 28.07.2020 / В. В. Куц, В. В. Пономарев ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ).

73. Патент на полезную модель № 106576 Российская Федерация, МПК В23С5/06. Фреза дисковая для обработки валов с равноосным контуром [Текст]/ Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Юго-Западный государственный университет» - № 2010134439/02; заявл. 17.08.2010; опубл. 20.07.2011, Бюл. №20.

74. Петухов, Ю.Е. Проектирование инструментов для обработки резанием деталей с фасонной винтовой поверхностью на стадии технологической подготовки производства [Текст] / Ю.Е. Петухов. Дис. ..д.т.н. Москва. 2004г. – 393.

75. Погораздов, В.В. Повышение эффективности процессов формообразования геометрически сложных поверхностей на основе новых способов, схем резания и инструмента [Текст] / В.В. Погораздов. Дис. ..д.т.н. Саратов. 1999г. – 398 с.

76. Полетаев В.А. Комбинированная обработка поверхностей тел вращения фрезерованием и фрезоточением с учетом технологического обеспечения их динамической устойчивости, Рыбинск, 2001г.

77. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Исследование и проектирование процессов зубонарезания инструментами червячного типа. - М.: Машиностроение-1, 2006. - 148 с. (Монография, 9,25 п.л., 500 экз.).

78. Полохин О.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А. Нарезание зубчатых профилей инструментами червячного типа: справочник/ под ред. Г.А. Харламова. - М.: Машиностроение, 2007. - 240 с. (Справочник, 14,7 п.л., 1000 экз.).

79. Полохин, О.Г. Совершенствование обработки цилиндрических зубчатых колес инструментами червячного типа на основе анализа математического отображения схемы резания [Текст] / О.Г. Полохин. Дис. ..к.т.н. Орел. 2003г. – 177с.

80. Понкратов, П. А. Разработка эффективного долбежного инструмента для обработки сложных криволинейных поверхностей по методу обкатывания : специальность 05.02.07 "Технология и оборудование механической и физико-технической обработки" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Понкратов Павел Александрович. – Курск, 2013. – 200 с.

81. Протасьев, В.Б. Расчет профиля поверхностей, обрабатываемых дисковыми инструментами при переменных параметрах установки. Текст. / В.Б. Протасьев, М.В. Ушаков, С.Ю. Илюхин //- М.: ВНИИТЭМР, 1985. 12 с.

82. Радзевич, С.П.. Формирование поверхностей деталей [Текст] / С.П. Радзевич Монография – К.: Растан, 2001. – 592 с.

83. Сахаров Г.Н. , Арбузов О.Б., Ю.А. Боровой, В.А. Гречишников, А.С. Киселев Металлорежущие инструменты, 1989. – 328 с.

84. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020611659, Российская Федерация, Программа расчета конструктивных параметров сборной дисковой фрезы для обработки протяженных длинных валов: № 2019667551; заявл. 24.12.2019; опубл. 06.02.2020 В.В. Куц, В.В. Пономарев, Ю.А. Мальнева; заявитель и патентообладатель Юго-западный государственный университет.

85. Сметанин, С.Д. Метод профилирующих окружностей при формообразовании винтовых поверхностей дисковым инструментом [Текст] / С.Д. Сметанин. Дис. ..к.т.н. Челябинск. 2008г. – 175 с.

86. Сотников, В.И. Повышение производительности зубонарезания цилиндрических прямозубых колес крупного модуля дисковыми твердосплавными фрезепротяжками [Текст] / В.И. Сотников. Дис. ..к.т.н. Орел. 2004г. – 212 с.

87. Ступков, В.Б. Повышение точности обработки каналовой винтовой поверхности на основе модификации проекционного метода профилирования [Текст] / В.Б. Ступков. Дис. ..к.т.н. Казань. 2003г. – 200 с.

88. Степаненко А.В. Сравнительный анализ производительности точения и касательного фрезерования поверхностей вращения [Текст] / А.В. Степаненко // Известия Тульского государственного университета.

89. Сухаркин, И.Н. Повышение эффективности зубофрезерования червячных и спироидных колес посредством комплексного управления процессов [Текст] / И.Н. Сухаркин. Дис. .к.т.н. Орел. 2009г. – 182 с.

90. Суханов, Р.С. Повышение износостойкости прорезных фрез на операции фрезерования пазов в язычковых иглах комбинированным ионно-лазерным упрочнением [Текст] / Р.С. Суханов. Дис. ..к.т.н. Иваново. 2003г. – 185 с.

91. Сухочев, Г. А. Управление качеством комбинированной обработки деталей транспортных машин, работающих в экстремальных условиях : специальность 05.02.08 "Технология машиностроения", 05.03.01 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Сухочев Геннадий Алексеевич. – Воронеж, 2005. – 32 с.

92. Тарапанов, А.С. Разработка метода комплексного анализа параметров процессов и управление лезвийной обработкой конструкционных материалов [Текст] / А.С. Тарапанов Дис. . к.т.н. Орел. 2002 г. – 320 с.

93. Тимченко, А.И. Исследование процесса формообразования профильных валов с равноосным контуром [Текст] / А.И. Тимченко. Дис. ..к.т.н. Москва. 1979г. – 120 с.

94. Тимченко, А. И. Процессы формообразования профильных поверхностей изделий с равноосным контуром [Текст] / А.И. Тимченко. Дис. ..д.т.н. Москва. 1993г. – 549 с.

95. Тимченко, А.И. Технология изготовления деталей профильных бесшпоночных соединений [Текст] / А.И. Тимченко. М.: ВНИИТЭМР, 1988. 160 с.

96. Ушаков, М.В. Теория расчета и технология изготовления инструментов с винтовым затылованием для изделий с мелкогабаритным периодическим профилем [Текст] / М.В. Ушаков. Дис. ..д.т.н. Тула. 1998г. – 390с.

97. Фролов, А.Н. Повышение виброустойчивости фрезерования на основе использования торцовых фрез переменной жесткости. [Текст] / А.Н. Фролов. Дис. ..к.т.н. Тула. 2005г. – 161с.

98. Харламов, Г.Н. Разработка теоретических и прикладных задач исследования и проектирования процессов формообразования поверхностей деталей при лезвийной обработке [Текст] / Г.Н. Харламов. Дис. ..к.т.н. Орел. 2003г. – 286 с.

99. Чевычелов, С.А. Повышение эффективности проектирования гиперболических фрез компьютерным моделированием процесса репрофилирования рельсов [Текст] / С.А. Чевычелов. Дис. ..к.т.н. Орел. 2005г. – 189 с.

100. Чемборисов, Н.А. Профилирование дисковых режущих инструментов для обработки винтовых поверхностей цилиндрических и конических деталей [Текст] / Н.А. Чемборисов Дис. ..д.т.н. Казань. 2003г. – 399 с.

101. Шитиков, А.Н. Проектирование сборных фасонных фрез для обработки наружного РК-профиля [Текст] / А.Н. Шитиков. Дис. ..к.т.н. Тула. 2007г. – 205 с.

102. Этин А.О. Кинематический анализ методов обработки металлов резанием. М.: Машиностроение. 1964. – 324 с.

103. Юликов, М.В. Теоретические основы системы проектирования режущего инструмента [Текст] / М.В. Юликов. Дис. ..д.т.н. М.:ВЗМИ,1978. – 524 с.

104. FORTUNA- POLIGON- Sistem. Arbeitsunterlager über Wellen- Naben Fer-bindungen. Stuttgart, BRD, s.a.- 48 s.

105. Musyl R., Das K- Profil eine zyklische Kurve- Maschinenbau- Maschinenbau- und Wermewirtschaft, 1946, № 314, s. 100- 102.

106. Musyl R., Die Anwendung der K- profilvebin dunder.- Maschinenbai und Wermewirtschaft, 1046, № 1, s. 100- 102.
107. Frank A., Pflanzl M. Die Norm Polygonverbindungen P3G und P4C - Geometrische Grundlagen, Funktionsverhalten und Fertigung// Welle-Nabe-Verbindungen: Systemkomponenten im Wandel. - Düsseldorf: VDI-Verlag, 1998, - S. 105-120, (VDI-Berichte 1384).
108. Frank A., Mayr R. Unrundschleifen Bilanz einer erfolgreichen Forschungsarbeit. Von der Soll-Kontur zum Werkstück// Technik-Report. - 1991. - №5A.- S. 46-48.
109. Fortuna-Polygon-System: Arbeitsunterlagen über Wellen-Naben-Verbindungen.- Stuttgart: Druckschrift der Fortuna-Werke, 1976. 65 s.
110. DIN 32711-79. Antriebselemente Polygonprofile P3G. Berlin: Beuth.-3 s.
111. DIN 32712-79. Antriebselemente Polygonprofile P4C. Berlin: Beuth.-3 s.
112. Giger H. Welle-Nabe-Verbindungen mit Polygonprofilen// Schweizer Maschinenmarkt. 1981. - № 50. - S. 24-28.
113. Frank A., Pflanzl M., Mayr R. Vom K-Profil und Polygonprofil zu fiink-ti-onsoptimierten Unrundprofilen eine österreichische Entwicklung. Fertigung// Präzision im Spiegel. - 1992. - № 3. - S. 42-48.
114. Ley H., Althaus P.G. Um die Ecke drehen// Der Maschinenmarkt. 1986. -№17.-S. 32-37.
115. Mayr R. Formschlüssige Welle-Nabe-Verbindungen mit innenschleif-barer Kontur: Diss. TH. Graz, 1993.- 173 s.
116. Schönwandt U. Neues Verfahren zum Drehen und Schleifen von Polygonprofilen// Z.WIRTSCH.FERT. 1989. - № 8. - S. 469-471.
117. Musyl R. Die kinematische Entwicklung der Polygonkurve aus dem K-Profil // Maschinenbau und Wärmewirtschaft. Wien: Springer Verlag, 1955. - № 2. - S. 33-36.

118. Frank A., Pflanzl M. Unrundschleifen auf CNC-Rundschleifmaschinen// Technik Report. 1986. - № 4. - S. 23-26.
119. Frank A., Trantin H., Pflanzl M. Die „Polygon-Normen" DIN 32711 und DIN 32712 „Upgrading" oder Neunormung// Welle-Nabe-Verbindungen: Gestaltung, Fertigung, Anwendungen. - Düsseldorf: VDI-Verlag, 2003, - S. 77-89, - (VDI-Berichte 1790).
120. Mechnik R.-P. Festigkeitsberechnung von genormten und optimierten PolygonWelle-Nabe-Verbindungen unter reiner Torsion: Diss. TH. Darmstadt, 1988. - 147 s.
121. Schmid A. Unrundschleifen auf prozessrechnergesteuerten Rundschleifmaschinen: Diss. TU. Graz, 1986. - 130 s.
122. Göttlicher C. Entwicklung einer verbesserten Festigkeitsberechnung für P3G-Polygon-Welle-Nabe-Verbindungen bei Torsions- und kombinierter Biege- und Torsionsbeanspruchung: Diss. TH. Darmstadt, 1994. 136 s.
123. Ziaei M. Untersuchungen der Spannungen und Verschiebungen in P4C-Welle-Nabe-Verbindungen mittels der Methode der finiten Elemente: Diss. TH. Darmstadt, 1997.- 128 s.
124. Späth H. Eindimensionale Spline-Interpolations-Algorithmen. München: Oldenbourg, 1990.-390 s.
125. Wengler S. Rechnergestützte Qualitätsbewertung an Stirnrad Verzahnungen: Diss. TU. Magdeburg, 1989. - 99 s.

## Приложение 1

Таблица 1. Матрицы обобщенных переменных

Вид движения	Матрицы, моделирующие движение относительно оси		
	X	Y	Z
Поступательное вдоль оси	$A^1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
Вращательное вокруг оси	$A^4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^5 = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$A^6 = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

## Приложение 2

18.08.20

**РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ**



**ПАТЕНТ**  
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ  
№ **2728269**

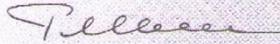
**Фреза дисковая для обработки валов с РК-профилем**

Патентообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Юго-Западный государственный университет" (ЮЗГУ) (RU)**

Авторы: **Куц Вадим Васильевич (RU),  
Пономарев Василий Владимирович (RU)**

Заявка № **2019136201**  
Приоритет изобретения **12 ноября 2019 г.**  
Дата государственной регистрации в  
Государственном реестре изобретений  
Российской Федерации **28 июля 2020 г.**  
Срок действия исключительного права  
на изобретение истекает **12 ноября 2039 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ильев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



## СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

**№ 2020611659**

**Программа расчета конструктивных параметров сборной  
дисковой фрезы для обработки протяженных длинных валов**

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Юго-Западный государственный университет» (ЮЗГУ) (RU)**

Авторы: **Куц Вадим Васильевич (RU), Пономарев Василий  
Владимирович (RU), Мальнева Юлия Андреевна (RU)**

Заявка № **2019667551**

Дата поступления **24 декабря 2019 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **06 февраля 2020 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ивлиев*

Г.П. Ивлиев



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор

АО «Энерготекс»



Сорокин А.В.

2022г.

### ТЕХНИЧЕСКИЙ АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы Пономарева В.В.

"Разработка методики проектирования фрез-протяжек с неравномерным угловым расположением режущих зубьев для обработки РК-профильных валов"

Настоящий акт выдан в подтверждение того, что в рамках конструкторско-технологической подготовки производства на АО «Энерготекс» внедрены результаты научного исследования Пономарева Василия Владимировича, а именно новый способ обработки РК-профильных ступеней валов, что позволило:

- повысить производительность обработки РК-профильных ступеней валов, за счет сокращения основного времени обработки на 15 – 20 %;
- повысить стойкость специального инструмента – фрезы-протяжки, оснащенного сменными многогранными пластинами на 20 – 30 %;
- обеспечить качество обработки РК-профильной ступени вала по отклонениям от заданной формы и точностью не ниже 10 квалитета.

Главный технолог АО «Энерготекс»

 /Ковалев М.В.