

На правах рукописи

Гончаров Александр Александрович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ ВИНТОВЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ НЕПРОФИЛИРОВАННЫМ  
ИНСТРУМЕНТОМ НА МНОГОЦЕЛЕВЫХ СТАНКАХ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2020

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор  
**Васильев Александр Сергеевич**

Официальные оппоненты: **Аверченков Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Компьютерные  
технологии и системы» ФГБОУ ВО  
«Брянский государственный технический  
университет»,  
**Моргунов Юрий Алексеевич**,  
кандидат технических наук, доцент,  
профессор кафедры «Технологии и  
оборудование машиностроения» ФГБОУ ВО  
«Московский политехнический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный  
технический университет» (ВолгГТУ)

Защита состоится \_\_\_\_\_ 2020 г. \_\_\_\_\_ на заседании  
диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном  
техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я  
Бауманская ул., д.5, стр. 1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим  
выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского  
государственного технического университета им. Н.Э. Баумана и на сайте  
[www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок 8(499) 267-09-63

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь совета  
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

## **Актуальность работы**

Непрерывное совершенствование машин и технических систем требует интенсивного развития технологических методов их изготовления. Неотъемлемой частью многих систем являются компрессорные и насосные установки – машины объёмного типа. Это вызывает не только постоянное повышение требований к качеству их рабочих органов, но и усложнение их конструкций.

Особым классом объёмных машин являются одновинтовые объёмные машины, применяемые для транспортировки высоковязких жидкостей. Основными поверхностями рабочих органов указанных машин являются сложнопрофильные циклоидальные винтовые поверхности (ЦВП). Одновинтовые насосы нашли широкое применение от нефтегазовой отрасли до пищевой промышленности. Тенденцией последних лет является применение одновинтовых объёмных машин для нужд высокоточного дозирования высоковязких веществ. Рабочим органом таких дозаторов является прецизионная миниатюрная героторная пара, состоящая из полимерной обоймы и стального ротора. Особенности этой пары являются повышенные требования к точности формы, а также малые размеры указанных поверхностей: диаметр сечения винтового ротора зачастую составляет 3..8 мм.

Развитие конструкций насосов и появление новых областей применения циклоидальных винтовых поверхностей требуют новых технологических подходов к их производству. Это делает исследования, связанные с разработкой новых методов обработки и методик, позволяющих технологически обеспечить качество обработки циклоидальных поверхностей, актуальными.

## **Цель работы**

Технологическое обеспечение качества формообразования циклоидальных винтовых поверхностей при обработке непрофилированным инструментом на многоцелевых станках с ЧПУ.

Основные задачи исследования:

1. Разработка стратегий обработки циклоидальных винтовых поверхностей на многоцелевых станках.
2. Исследование технологических возможностей разработанных стратегий обработки.
3. Разработка методики обеспечения качества обработки при реализации предложенных стратегий.
4. Метрологическое исследование параметров качества поверхностей, обработанных с применением предложенной методики.

**Предметная область** исследования – технологическая подготовка производства циклоидальных винтовых поверхностей.

**Объект исследования** – технологические решения уровня операционной технологии изготовления циклоидальных винтовых поверхностей на многоцелевых станках с ЧПУ.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Специальные стратегии обработки циклоидальных винтовых поверхностей с

различными типами профилей непрофилированным инструментом на многоцелевых фрезерных станках с ЧПУ.

2. Методика управления подачей при обработке циклоидальных винтовых поверхностей, позволяющая обеспечить заданное качество их изготовления.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Доказана перспективность обработки циклоидальных винтовых поверхностей непрофилированным инструментом на многоцелевых станках.

2. Разработаны оригинальные стратегии обработки циклоидальных винтовых поверхностей с однозаходными, двухзаходными, трехзаходными профилями, а также сложнопрофильных конических поверхностей.

3. Разработана формализованная методика управления подачей инструмента за счет указания величины подачи в коде управляющей программы, позволяющая обеспечивать заданное качество указанных поверхностей инвариантно их конструктивным параметрам.

4. Разработана система автоматизированного программирования, основанная на формализованном алгоритме расчета траектории по предложенным стратегиям, с встроенным модулем управления подачей.

#### **Методы исследования**

Теоретические расчеты траектории движения инструмента при формообразовании циклоидальных винтовых поверхностей по предложенным стратегиям выполнены с использованием математического аппарата аналитической геометрии. Исследование технологических возможностей стратегий обработки выполнено на базе математической модели обработки, а результаты проверены с помощью трехмерной компьютерной симуляции твердотельной модели, а также при проведении натурного эксперимента. При разработке методики обеспечения качества обработки по предложенным стратегиям были применены численные методы расчета с использованием автоматизированных систем. Метрологическое подтверждение эффективности предложенной методики повышения качества получено в ходе экспериментального исследования формы поперечного сечения обработанных натуральных образцов.

#### **Практическая значимость**

Разработан подход к обработке циклоидальных винтовых поверхностей, позволяющий обрабатывать широкую номенклатуру типоразмеров винтовых роторов на неспециализированном оборудовании за счет применения предложенных стратегий обработки циклоидальных винтовых поверхностей с различными типами профилей и методики управления подачей в процессе обработки, что особенно актуально при производстве рабочих органов прецизионный одновинтовых дозаторов высоковязких веществ, применяемых в машиностроении, приборостроении, медицине, при производстве электроники.

**Достоверность результатов** подтверждается корректным использованием методов математической статистики для оценки стабильности получаемых при обработке показателей качества, достаточной репрезентативностью

статистических выборок и соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

### **Личный вклад**

Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии в результате проведения экспериментальных и расчетных работ. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Лучшие технологические школы России» (Рыбинск, 2017); на 19-ой международной специализированной выставке «Металлообработка» (Москва, 2018); на XI Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2018); на 25-ой Международной промышленной выставке «Металл-Экспо» (Москва, 2019). Основные разделы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры технологий машиностроения МГТУ им.Н.Э.Баумана в 2016..2020 г.г.

### **Публикации**

По содержанию работы и основным результатам исследования опубликовано 7 научных работ, в том числе шесть статей в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, одна статья в журнале, индексируемом базой Web of Science, общим объемом 8,32 п.л., а также получен патент на полезную модель.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Общий объем работы составляет 107 страниц, список литературы содержит 47 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность решаемых научно-технических задач, формулируются цели, задачи исследования и научная новизна и практическая значимость предлагаемых решений.

**В Главе 1** рассмотрены современные типы одновинтовых объемных машин, проведен обзор и анализ существующих методов обработки циклоидальных винтовых поверхностей (ЦВП).

Впервые на отечественных предприятиях технология изготовления рабочих органов одновинтовых объемных машин была реализована в Пермском филиале Всесоюзного научно-исследовательского института буровой техники (ВНИИБТ). Большой вклад в ее создание и совершенствование внесли С.С. Никомаров, А.Н. Вшивков, С.А. Ганелина, А.Д. Коновалов, Ю.А. Коротаев, Н.Д. Сумцова, А.В. Цепков и специалисты упомянутого выше института. В настоящее время крупнейшими предприятиями, специализирующимися на производстве винтовых насосов, являются: АО «ГМС Ливгидромаш» г. Ливны; ООО «Фирма «Радиус-Сервис» г. Пермь; ООО «Гидробур-сервис» г. Пермь; ООО «Белгородский гидромеханический завод» г. Белгород.

Над решением проблемы формообразования рассматриваемых поверхностей работали следующие отечественные ученые: Ю.С. Степанов, А.В. Киричек, А.С.

Тарапанов, Г.А. Харламов, М.В. Бородин, Б.И. Афанасьев, Д.С. Фомин, А.С. Брусов, Ю.А. Коротаев, В.А. Данилов. Большинство работ перечисленных авторов направлено на создание методов обработки на основе специализированного оборудования с кинематически сложными движениями и специального профилированного инструмента.

Анализ технологических возможностей современных методов обработки показал, что все они имеют весьма ограниченную область применения с точки зрения геометрических параметров ЦВП. Особенно актуальна проблема отсутствия методов обработки деталей с миниатюрными ЦВП. Так, например, производством изделий, использующих в качестве рабочих органов детали с миниатюрными циклоидальными поверхностями, в 2010 году на мировом рынке занималась только компания ViscoTec Pumpen- u. Dosiertechnik GmbH, а к 2018 году уже около восьми компаний в Германии, Японии, США и Китае специализировались на производстве подобной продукции. Если рассматривать производство изделий с коническими ЦВП, то в настоящий момент данную технологическую задачу решили только специалисты компании VertRotors (Шотландия) в 2014 году, что позволило им производить уникальные миниатюрные одновинтовые конические компрессоры для космонавтики, медицины и робототехники.

Выявлено, что технологические возможности существующих методов обработки ЦВП не удовлетворяют современным требованиям производства, не обладают достаточной гибкостью, особенно в области обработки миниатюрных ЦВП, ЦВП с многозаходными профилями, а также конических ЦВП. Можно утверждать, что в ближайшие годы наиболее востребованными будут методы, реализуемые на многоцелевых фрезерных станках с ЧПУ, а наиболее экономически целесообразным в условиях многономенклатурного производства является применение 4-х координатных фрезерных станков с поворотной осью совместно с непрофилированным инструментом.

**В Главе 2** рассмотрены существующие стратегии обработки непрофилированным осевым инструментом сложнопрофильных поверхностей на 4-х координатных фрезерных станках с поворотной осью и предложен набор специальных стратегий обработки для ЦВП с однозаходным, двухзаходным и трехзаходными профилями, а также для конических ЦВП с заданными параметрами изменения диаметра, шага и эксцентриситета.

В основе разработанных стратегий обработки лежит математическая модель, позволяющая производить расчет координат вершины фрезы основываясь на информации о геометрии поверхности в параметрическом виде (Рис. 1).

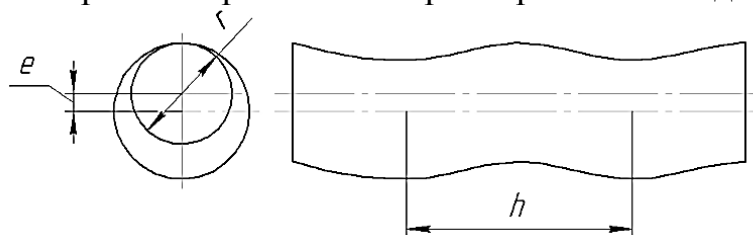


Рис. 1. Параметризированный чертеж однозаходной ЦВП:  $h$  – шаг винтовой поверхности,  $e$  – эксцентриситет,  $r$  – радиус сечения

Предложена стратегия обработки винтовой поверхности цилиндрической частью концевой фрезы, расположенной перпендикулярно оси винта (Рис. 2). Формообразование винтовой поверхности происходит за счет перемещения инструмента относительно оси вращения заготовки в осевом и вертикальном направлении, причем цилиндрическая поверхность инструмента в любой момент процесса обработки является касательной к обработанной винтовой поверхности.

Для осуществления процесса обработки необходимо управление тремя параметрами: вращательное, осевое и вертикальное движения подачи. Приняты следующие обозначения:  $A$  – угол поворота заготовки в градусах;  $X$  – координата оси фрезы относительно начала координат в направлении оси вращения заготовки, мм;  $Y$  – координата оси фрезы относительно оси заготовки в вертикальном (перпендикулярно оси заготовки) направлении, мм.

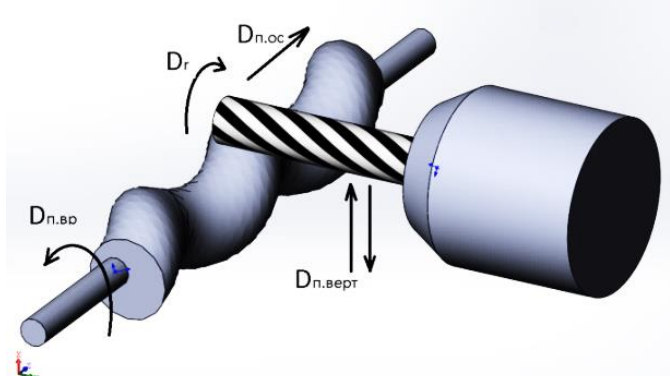


Рис. 2. Схема обработки винтового ротора осевым инструментом

На Рис. 3,а представлена иллюстрация расчета координаты точки касания фрезы в ее крайнем положении. Расчет координаты точки касания для произвольного угла поворота заготовки должен осуществляться по схеме, изображенной на Рис. 3,б.

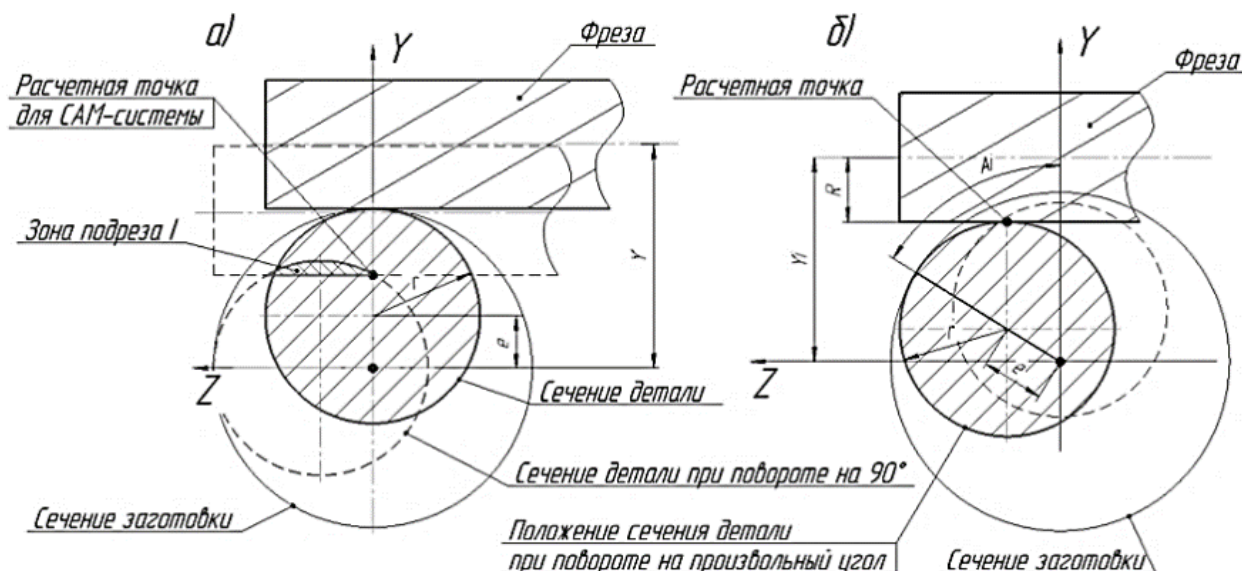


Рис. 3. Графическое изображение относительного положения инструмента и заготовки во время обработки ЦВП в плоскости, перпендикулярной оси заготовки

В соответствии с моделью на рис. 3,б были получены выражения координат  $X_i$ ,  $Y_i$  и  $A_i$  для произвольного относительного положения заготовки и фрезы:

$$\begin{cases} X_i = \frac{s \cdot t}{360}; \\ Y_i = e \cdot \cos(t) + r + R \\ A_i = \frac{(360 + \Delta A) \cdot t}{360}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t$  – параметр, град.;  $s$  – подача, мм/об;  $\Delta A$  – приращение угла, обеспечивающее закручивание спирали («+» для правого винта; «-» для левого), град.;  $\Delta A = \frac{360 \cdot s}{h}$ , где  $h$  – шаг подъема винта,  $R$  – радиус фрезы

Изложенные выше зависимости позволяют получить винтовую поверхность, однако, не учитывают подрезание уже обработанной поверхности фрезой, что изображено на Рис. 4.

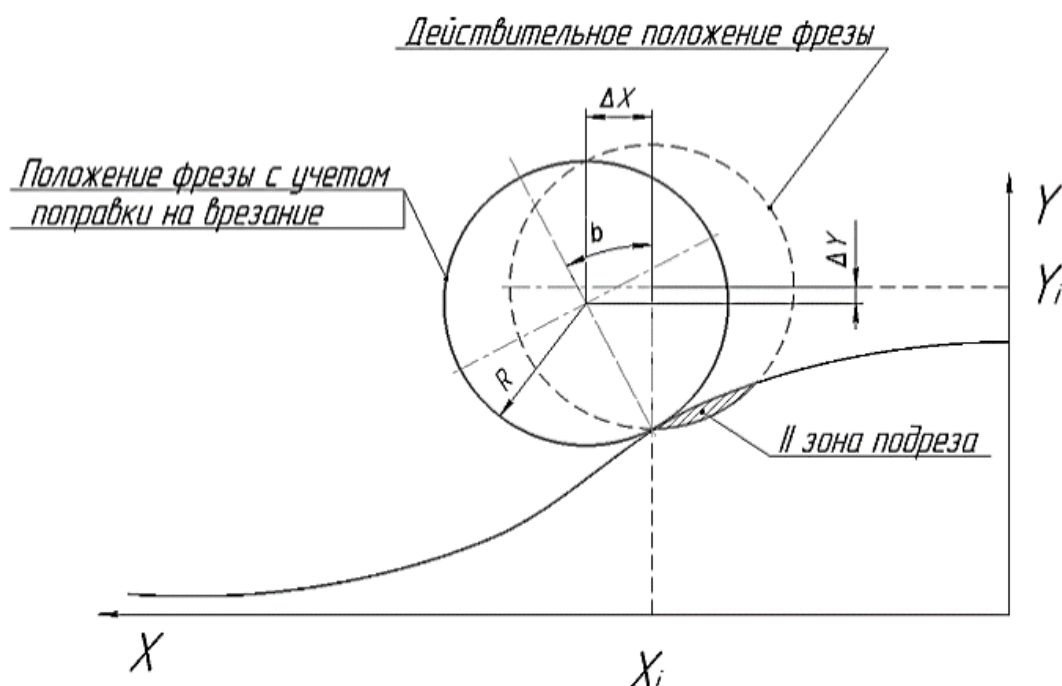


Рис. 4. Графическое изображение относительного положения инструмента и заготовки ротора во время обработки в плоскости, расположенной вдоль оси заготовки

На Рис. 4 проиллюстрирована необходимость ввода поправок  $\Delta X$  и  $\Delta Y$  в уравнения координат оси фрезы. С учетом данных поправок уравнения, описывающие траекторию движения фрезы, примут следующий вид:

$$\begin{cases} X_i = -\frac{s \cdot t}{360} + R \cdot \sin\left(\frac{360 \cdot e}{h} \cdot \sin(t)\right) \\ Y_i = e \cdot \cos(t) + r + R + R \cdot \left(\left|\cos\left(\frac{360 \cdot e}{h} \cdot \sin(t)\right)\right| - 1\right); \\ A_i = \frac{(360 + \frac{360 \cdot s}{h}) \cdot t}{360} \end{cases} \quad (2)$$

Для формообразования многозаходных ЦВП необходимо применять набор стратегий обработки, меняющихся в зависимости от обрабатываемого в данный момент участка поперечного сечения ЦВП. Для формообразования профиля двухзаходной поверхности потребуется последовательная обработка шести

участков (Рис. 5,а), а для трехзаходного профиля необходимо трехкратное повторение последовательной обработки трех участков (Рис. 5,б), на каждом из которых стратегия движения фрезы будет отличаться из-за наличия геометрических ограничений.

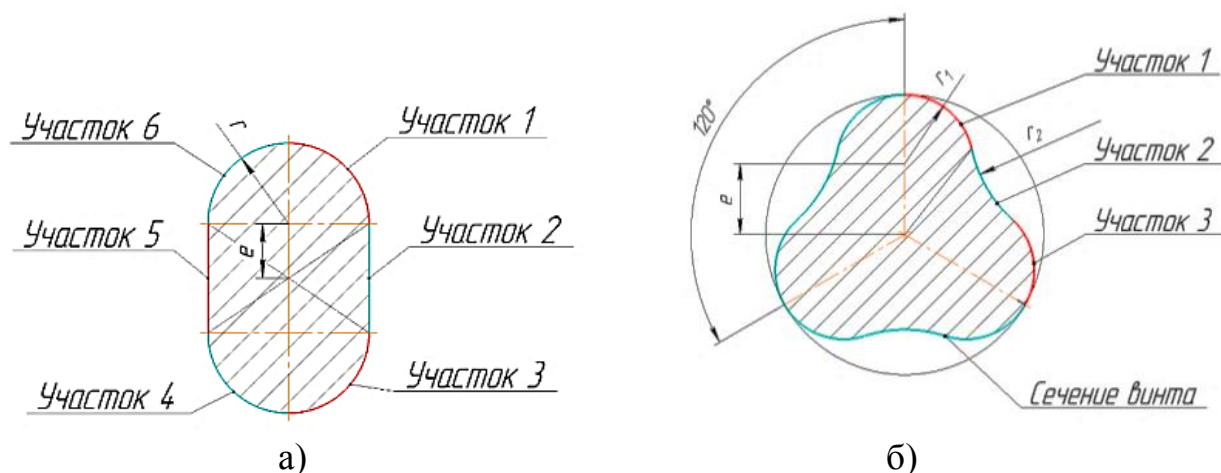


Рис. 5. Сечения двухзаходной (а) и трехзаходной (б) ЦВП, разбитые на участки с различными стратегиями обработки

Таким образом были получены математические модели обработки двухзаходных и трехзаходных ЦВП. Математические модели обработки различных типов циклоидальных винтовых поверхностей, траектории и соответствующие примеры обработанных поверхностей показаны в Таблице 1.

Таблица 1.

Математические модели обработки различных профилей циклоидальных винтовых поверхностей

| Тип пов-ти   | Эскиз обработки | Математическая модель | Траектория | Пример реализации |
|--------------|-----------------|-----------------------|------------|-------------------|
| Однозаходная |                 |                       |            |                   |
| Двухзаходная |                 |                       |            |                   |
| Трехзаходная |                 |                       |            |                   |

Для сокращения трудоемкости технологической подготовки производства роторов различных типоразмеров и сечений разработана автоматизированная система программирования (САП), позволяющая генерировать файл с кодом

управляющей программы. В основе системы лежат аналитические математические модели, описывающие различные стратегии обработки. Входными параметрами для данной САП являются: тип винтовой поверхности; геометрические параметры винтовой поверхности; геометрические параметры инструмента; величина осевой подачи (шероховатость поверхности); режимы резания. Для разработки системы использовался программный пакет MS EXCEL и интегрированная в него среда разработки программного обеспечения Microsoft® Visual Basic®.

Сразу после ввода геометрических параметров обработки в диалоговое окно системы может быть получен код управляющей программы (УП) для станка с ЧПУ. При использовании такой системы трудоемкость технологической подготовки производства ЦВП складывается из времени ввода данных в параметрическом виде и времени автоматического расчета. Длительность расчета УП может составлять от одной секунды до нескольких минут, в зависимости от заданной величины подачи и вычислительной мощности машины. Пример полученной траектории движения инструмента представлен на Рис. 6.

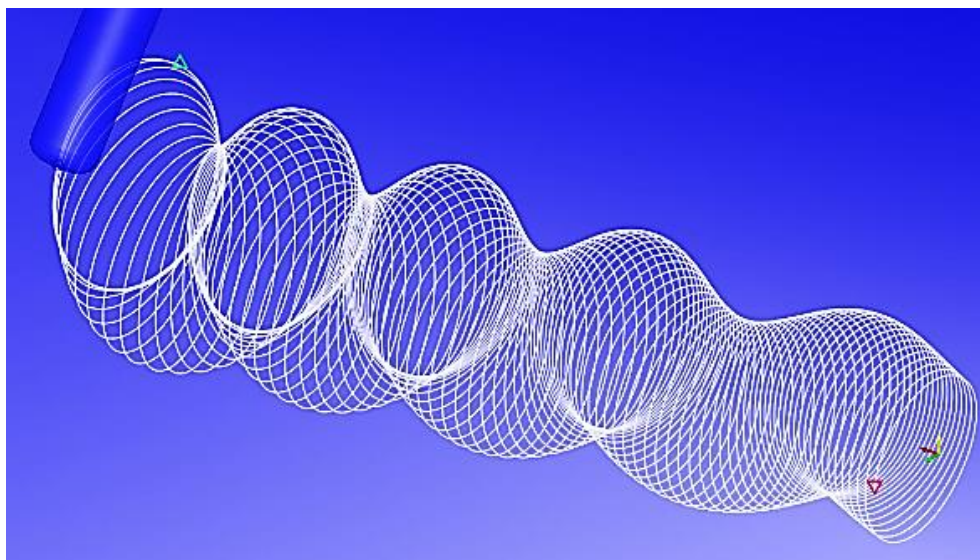


Рис. 6. Траектория движения инструмента при обработке однозаходной конической ЦВП

При реализации обработки ЦВП по предложенным стратегиям было выявлено, что при некоторых сочетаниях параметров геометрии поверхности и параметров режущего инструмента происходит вырождение геометрии профиля винтовой поверхности. Для того чтобы исключить возможность таких отклонений на этапе технологической подготовки были определены области применимости разработанных стратегий. Получен аналитический критерий  $K_a$ , позволяющий на этапе технологической подготовки провести проверку заданных геометрических параметров обработки. При положительном значении параметра не будет происходить вырождение циклоиды, что гарантирует формообразование ЦВП с заданными параметрами.

$$K_a = -(e + r) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \left(1 - \frac{\arctg\left(\frac{r}{e}\right)}{\arctg\left(\frac{r}{e}\right) + \frac{\pi}{4}}\right) - \frac{R}{2\sqrt{1 - \left(1 - \frac{\pi^2 e^2}{4h^2}\right) \cos^2\left(\frac{2\pi e}{h}\right)}} \left(1 - \left|\cos\left(\frac{2\pi e}{h}\right)\right|\right) \cdot \sin\left(\frac{3\pi}{4} - \arctg\left(\frac{r}{e}\right)\right) \geq 0, \quad (3)$$

В Главе 3 рассмотрены требования, предъявляемые к качеству ЦВП, выделено наиболее трудоемкое с точки зрения технологического обеспечения требование, разработана методика обеспечения точности формы поперечного сечения, направленная на стабилизацию силы резания за счет программного управления величиной подачи. Методика была формализована и интегрирована в специализированную САП.

Эксплуатационные характеристики одновинтовых насосов и особенно насосов-дозаторов определяются качеством изготовления винтовой пары. Анализ требований к качеству ЦВП показал, что на этапе формообразования этих поверхностей на фрезерном станке с ЧПУ необходимо обеспечить размерную точность (шаг, эксцентриситет, диаметр сечения), а также точность формы поперечного сечения, в частности обеспечить заданное отклонение от круглости. Наиболее трудоемкой технологической задачей является обеспечение круглости сечения ЦВП, поэтому в работе рассматривается именно этот параметр качества. Величина отклонения от круглости поперечного сечения определяется допустимым отклонением величины коэффициента натяга в зацеплении.

Согласно нормативам, значение коэффициента натяга должно находиться в пределах 0,005-0,010. Учитывая, что колебание величины натяга в зацеплении вызвано не только отклонениями формы ротора, но и отклонениями формы поперечного сечения охватывающей обоймы, можно считать, что колебание величины натяга складывается из погрешности формы ротора и статора.

В виду того, что статор изготавливается из полимерных материалов, и соответственно, обеспечение точности его формы более трудоемкая задача, было принято, что 70% от возможной величины колебания натяга составляет погрешность формы отверстия статора, и 30% - погрешность формы ротора. Результаты оценки значений допустимых величин отклонения профилей элементов циклоидального зацепления представлены в Таблице 2.

Таблица 2.

Оценочные значения допустимых величин отклонения профилей элементов циклоидального зацепления

| № | Средний диаметр, мм | Значение коэффициента натяга $c_\delta$ | Отклонение формы статора, мкм | Отклонение формы ротора, мкм |
|---|---------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 1 | 10                  | 0,005-0,010                             | 35                            | 15                           |
| 2 | 4,8                 | 0,005-0,010                             | 17                            | 7                            |

В результате анализа факторов, оказывающих влияние на точность формы обрабатываемых ЦВП, выявлено, что в данном случае решающее значение имеет

На Рис. 7 показано изменяющееся пятно контакта фрезы и заготовки в продольном направлении. Аналогичные колебания припуска имеются и в поперечном сечении заготовки. Величина припуска на «вершине» винтовой поверхности и во «впадине» может отличаться в несколько раз, что является причиной постоянного изменения силы резания в процессе обработки, что в свою очередь приводит к образованию отклонения от круглости поперечного сечения винтовой поверхности.



Полученная математическая модель изменения объема, снимаемого за единицу времени при повороте заготовки, легла в основу алгоритма численного расчета динамики изменения силы резания в процессе обработки текущего поперечного сечения ЦВП. Обратно пропорционально изменению объема снимаемого материала рассчитывается величина минутной подачи, относительное изменение которой можно видеть на Рис. 8.



Рис. 8. Относительное изменение величины подачи за один оборот заготовки

Интеграция алгоритма расчета изменения подачи в автоматизированную систему расчета траектории обработки позволила динамически управлять величиной подачи за счет указания в каждом кадре управляющей программы соответствующего значения параметра F. Фрагмент кода управляющей программы представлен ниже:

```
...
N0105 G1 X0.260 Y5.478 A12.24 F126
N0110 G1 X0.281 Y5.473 A13.26 F128
N0115 G1 X0.302 Y5.468 A14.28 F130
...
```

Применение автоматизированной системы расчета траектории совместно с формализованным алгоритмом расчета изменения величины подачи позволяет значительно снизить трудоемкость подготовки кода управляющей программы за счет следующих особенностей:

- отсутствует необходимость построения трехмерной модели обрабатываемой поверхности;
- отсутствует необходимость настройки параметров стратегии в САМ-системе;
- ввиду того, что расчет траектории ведется в параметрическом виде, а не по трехмерной модели, время вычисления значительно меньше, что особенно важно при использовании маломощных вычислительных машин.

При однократной обработке ЦВП с постоянной подачей инструмента её величина определяется по зоне с максимальным припуском (возможно незначительное повышение величины постоянной подачи в пределах 20% без изменения качества обрабатываемой поверхности), то есть при перемещении инструмента в зону с меньшим припуском фреза будет испытывать значительно меньшие силовые воздействия. Применение динамически изменяющейся подачи позволяет интенсифицировать режимы обработки на участках с минимальными

припусками и снизить в зонах высоких нагрузок, что позволяет в значительной степени уменьшить основное время обработки ЦВП (Рис. 9).

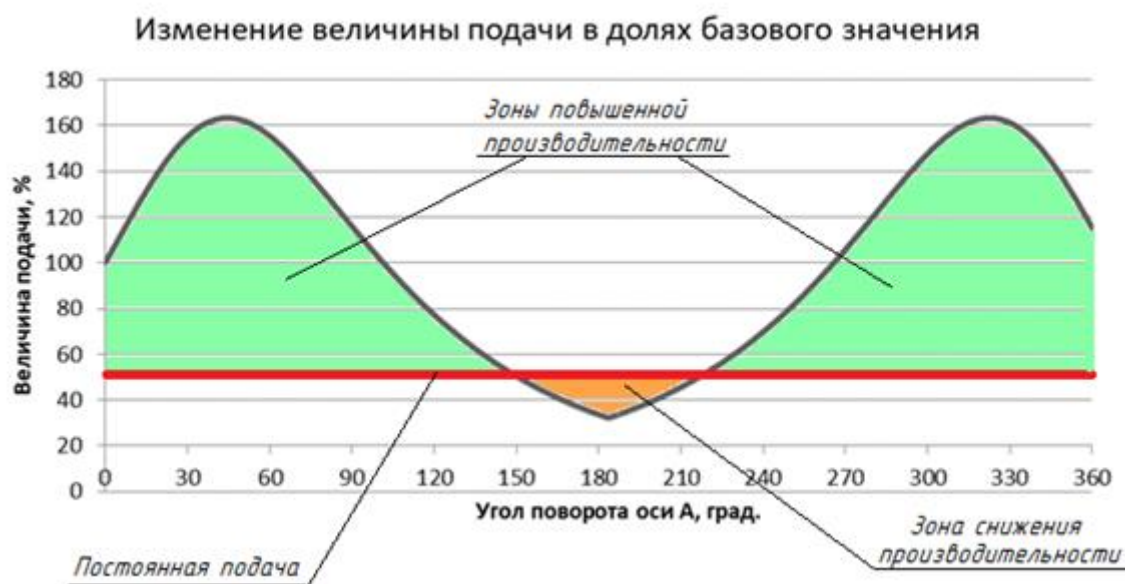


Рис. 9. Иллюстрация возможностей интенсификации режимов обработки за счет динамического управления подачей

Таким образом, динамическое изменение величины подачи в коде управляющей программы позволяет не только снизить отклонение формы поперечного сечения ЦВП за счет стабилизации силового воздействия, но и уменьшить основное время обработки в несколько раз за счет интенсификации режимов в зонах с малыми припусками. При этом для реализации предложенной методики не требуется модернизация оборудования или применение дополнительных средств технического оснащения, что положительно сказывается на экономическом эффекте от использования методики.

**В Главе 4** приведены результаты экспериментального исследования, направленного на метрологическое подтверждение предложенной методики обеспечения точности формы поперечного сечения ЦВП. Для этого был проведен сравнительный эксперимент, который показал наличие положительного влияния на величину отклонения от круглости сечения поверхности, обработанной с применением предложенной методики.

В качестве объекта для проведения экспериментального исследования был выбран ротор одновинтового дозатора МОНОРОТОР 480674, являющийся самым высокоточным из всей линейки производимых в России дозаторов, соответственно, к его рабочим органам предъявляются наиболее высокие требования. Кроме того, данный ротор имеет минимальные габариты поперечного сечения, что позволяет оценить эффективность предложенных решений для технологической системы с минимальной жесткостью.

Обработка двух серий образцов из стали 12Х18Н10Т проводилась на вертикально-фрезерном обрабатывающем центре Haas MiniMill2 с последующими измерениями отклонения от круглости в двух сечениях на кругломере Roundtest RA-2200 (Рис. 10).



Рис. 10. Обработка образца на фрезерном станке с ЧПУ и измерение отклонения от круглости поперечного сечения образца

В ходе эксперимента обработано две серии образцов с идентичными геометрическими параметрами. В каждой серии обрабатывалось по 5 образцов. Обработка всех 10-ти образцов производилась без переналадки оборудования. Для уменьшения влияния процесса износа на полученные результаты, при обработке каждой серии использовалась новая фреза с предварительно измеренным диаметром, а код управляющей программы корректировался с учетом текущего диаметра фрезы. Для измерения инструмента использовалась встроенная в станок контактная 3D система OTS для наладки инструмента от Renishaw, которая позволяет определять геометрические параметры инструмента с повторяемостью 1,00 мкм.

Измерения отклонения от круглости проводились в соответствии с эскизом, изображенным на Рис. 11, в двух сечениях: на свободном конце заготовки и в сечении близком к закрепленному концу. Проводить измерение отклонения от круглости в двух сечениях необходимо в виду того, что обработка производилась консольно закрепленной заготовки и выбранные сечения соответствуют зонам с максимальной и минимальной жесткостью технологической системы.

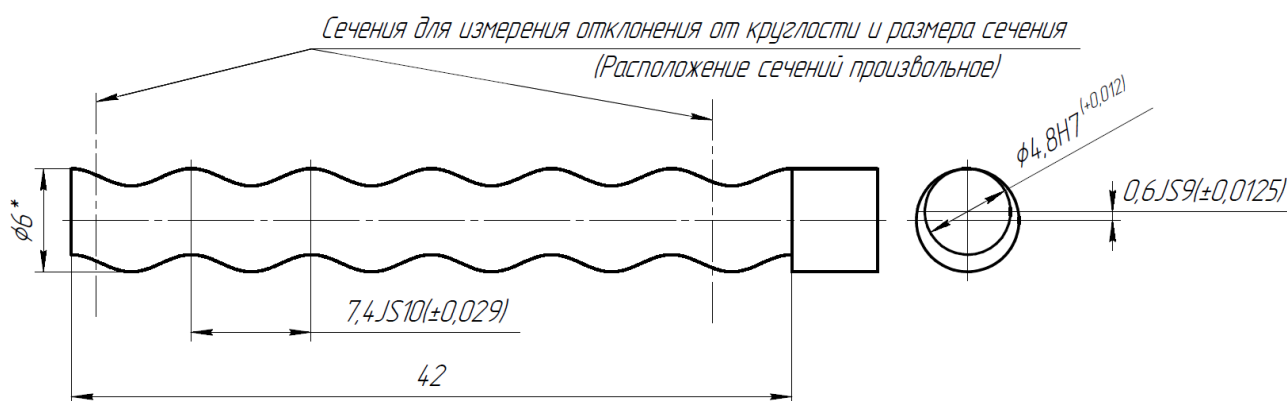


Рис. 11. Расположение сечений измерения отклонения от круглости

При измерении использовался щуп для контроля глубоких пазов 12AAL023 с сапфировым наконечником с минимальным диаметром при вершине  $D=0,5$  мм (Рис. 12).

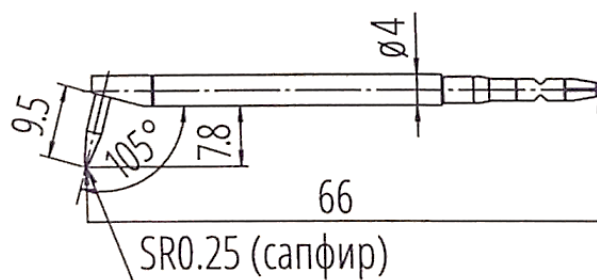


Рис. 12. Эскиз применяемого щупа

В результате измерений был получен массив круглограмм для 10-образцов. Анализ графиков отклонения от круглости, представленных в декартовой системе координат, показал наличие систематической методической погрешности измерений в виде гармонического закона. Эту погрешность вызывает сложная форма измеряемого тела, а конкретнее, невозможность обкатывания щупом заданного сечения в виду использования щупа со сферической вершиной. На Рис. 13 наглядно показана причина возникновения данной погрешности. В процессе обкатывания щупом конкретного поперечного сечения реальная точка контакта смещается из-за большой кривизны обкатываемой поверхности, чем искажает получаемые значения отклонения от круглости.

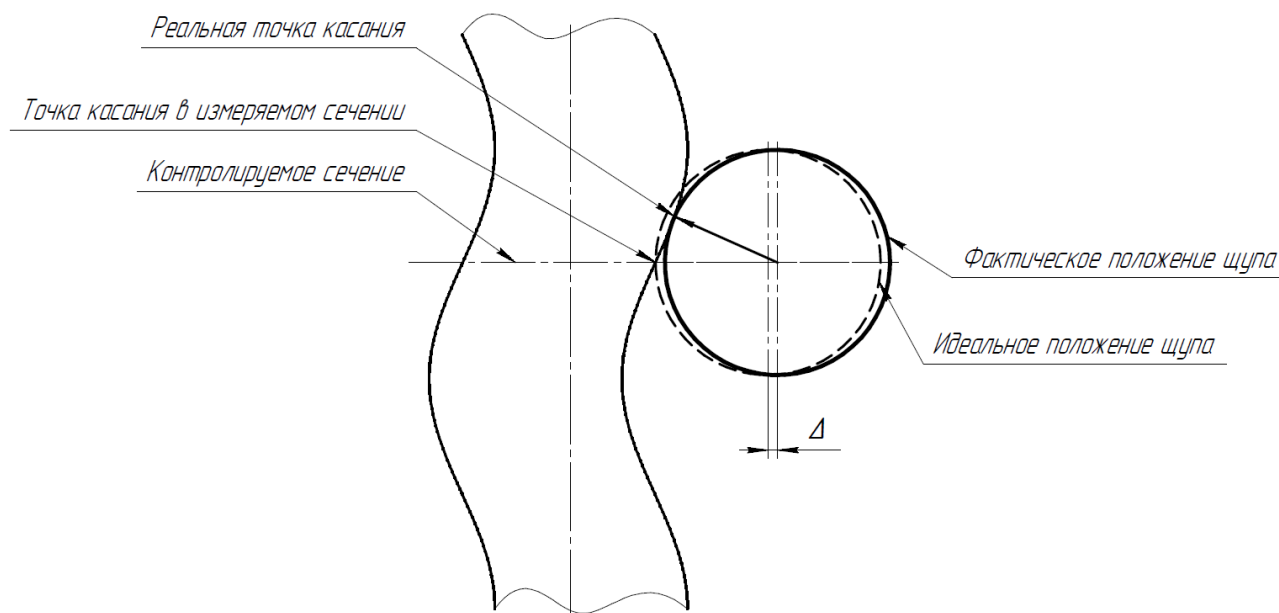


Рис. 13. Эскиз, демонстрирующий наличие погрешности измерения

Зависимость величины этого отклонения от угла поворота измеряемой детали была определена аналитически. Полученные распределения отклонения от круглости были скорректированы в соответствии с распределением методической погрешности. Полученные значения отклонения от круглости поперечного

сечения образцов, обработанных с постоянной величиной подачи и динамически изменяющейся подачей, представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Значения отклонения от круглости поперечного сечения образцов с учетом методической погрешности, мкм

| Серия обработки          | Положение | Номер образца |        |        |        |        | Среднее       | Квалитет    |
|--------------------------|-----------|---------------|--------|--------|--------|--------|---------------|-------------|
|                          |           | 1             | 2      | 3      | 4      | 5      |               |             |
| С постоянной подачей     | сеч. 1    | 24.327        | 26.420 | 26.192 | 27.921 | 31.959 | <b>27.364</b> | <b>IT10</b> |
|                          | сеч. 2    | 32.751        | 35.209 | 33.252 | 42.711 | 48.019 | <b>38.388</b> |             |
| С динамич. измен. подачи | сеч. 1    | 7.030         | 5.325  | 7.852  | 6.959  | 9.312  | <b>7.296</b>  | <b>IT7</b>  |
|                          | сеч. 2    | 14.593        | 12.351 | 15.687 | 15.255 | 17.751 | <b>15.127</b> |             |

Фактическое отклонение от круглости уменьшилось на **73%** для сечения №1 и на **60%** в сечении №2, что позволяет заключить, что применение динамического управления подачей позволило повысить точность циклоидальной винтовой поверхности на 2..3 квалитета без изменения состава оборудования, технологической оснастки и инструмента.

### Общие выводы по диссертации

1. Существует актуальная научная задача разработки технологического обеспечения качества формообразования рабочих органов изделий, обладающих циклоидальными винтовыми поверхностями с различными типами сечений, имеющая важное значение для машиностроения РФ.
2. Технологические возможности существующих методов обработки циклоидальных винтовых поверхностей не удовлетворяют современным требованиям производства, не обладают достаточной гибкостью, особенно в области обработки миниатюрных поверхностей, поверхностей с многозаходными профилями, конических винтовых поверхностей.
3. Перспективным при изготовлении циклоидальных винтовых поверхностей в условиях многономенклатурного производства является применение четырехкоординатных фрезерных станков с поворотной осью совместно с непрофилированным осевым инструментом.
4. Предложенные стратегии обработки непрофилированным инструментом на многоцелевых станках с ЧПУ позволяют обеспечить получение циклоидальных винтовых поверхностей с однозаходными, двухзаходными, трехзаходными профилями, а также сложнопрофильных конических поверхностей с точностью в диапазоне IT 7...IT 10.
5. Предложенные стратегии обработки циклоидальных винтовых поверхностей при заданных условиях обработки имеют ограниченные технологические возможности, априори оцениваемые по значениям предложенного формализованного критерия.
6. Система автоматизированного программирования, созданная на основе разработанного алгоритма расчета траектории движения фрезы, позволяет проводить технологическую подготовку производства деталей, содержащих

циклоидальные винтовые поверхности, затрачивая при этом не более 2 минут работы технолога-программиста.

7. Динамическое управление величиной подачи в процессе обработки позволяет уменьшить основное время обработки не менее чем на 60% за счет интенсификации режимов на участках с малыми припусками, а также позволяет повысить точность циклоидальной винтовой поверхности на 2..3 квалитета без изменения состава оборудования, технологической оснасти и инструмента.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### **Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:**

1. Гончаров А.А., Гемба И.Н. Обработка сложнопрофильных деталей типа тел вращения на станках с ЧПУ // Главный механик. 2015. №8. С. 26-31. (0,8 п.л./0,5 п.л.)
2. Гончаров А.А., Гемба И.Н. Обработка винтовых поверхностей на фрезерных станках с ЧПУ // Главный механик. 2016. №1. С. 50-53. (0,45 п.л./0,3 п.л.)
3. Гончаров А.А., Васильев А.С., Гемба И.Н. Обработка многозаходной винтовой поверхности ротора винтового насоса на фрезерных станках с ЧПУ // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2017. №4. С. 8-16. (2,1 п.л./1,5 п.л.)
4. Гончаров А.А., Васильев А.С., Гемба И.Н. Современные методы обработки винтовых поверхностей роторов винтовых насосов // Вестник РГВТУ имени П.А.Соловьева. 2017. №1(40). С. 202-208. (1,0 п.л./0,6 п.л.)
5. Гончаров А. А., Ахмад Д. Н., Щадилов А. С. Расширение технологически возможностей стандартного оборудования с ЧПУ для обработки винтовых поверхностей роторов одновинтовых насосов. // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2018. №8. С. 8-13. (1,5 п.л./0,7 п.л.)
6. Гончаров А.А., Греков И.С. Применение экспериментальной методики разработки высокоэффективного технологического процесса обработки винтовых циклоидальных поверхностей свободным абразивом // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2019. № 11. С. 33-39. (1,27 п.л./0,6 п.л.)

#### **Публикации в рецензируемых журналах, индексируемые WoS:**

7. Васильев А.С., Гончаров А.А. Специальная стратегия обработки сложнопрофильных конических винтовых поверхностей рабочих органов одновинтовых компрессоров / А.С.Васильев, А.А.Гончаров // Записки Горного института. 2019 Т. 235 С. 60-64. (1,2 п.л./0,9 п.л.)

#### **Патенты:**

8. Приспособление для формообразования винтовой поверхности роторов одновинтовых насосов на токарном станке, оснащённом числовым программным управлением: патент на полезную модель №185998 РФ / Гончаров А.А.; заяв. 2017.12.08; опубл. 2018.12.26.