



004604036

На правах рукописи

КОЛОБАЕВ Алексей Владимирович

**ПРОФИЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВИНТОВЫХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ СБОРНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки

Тула 2010

**10 ИЮН 2010**

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Тульский государственный университет»

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент  
Феофилов Николай Дмитриевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Борискин Олег Игоревич

кандидат технических наук  
Полуэктов Алексей Евгеньевич

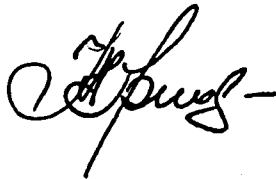
Ведущая организация - ОАО «Тулаточмаш», г. Тула.

Защита состоится «18» июня 2010 г. в 14-00 на заседании диссертационного совета Д212.271.01 при ГОУ ВПО «Тульский государственный университет» по адресу: 300600, г. Тула, пр. Ленина, 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО «Тульский государственный университет».

Автореферат разослан «7» мая 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



А. Б. Орлов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Зубчатые передачи широко применяются в машиностроении и приборостроении. Наибольшее их количество приходится на цилиндрические передачи, составленные из эвольвентных колес. Точность зубчатых колес непосредственно связана с точностью зубообрабатывающих станков и зуборезного инструмента.

Червячные фрезы являются наиболее распространенными инструментами для чистовой и получистовой обработки колес. По конструкции фрезы изготавливаются монолитными, составными и сборными. Из предшествующих работ известно, что цилиндрическое эвольвентное колесо должно находиться в станочном зацеплении с червячной фрезой, режущие кромки которой располагаются на эвольвентной винтовой производящей поверхности.

Монолитные и составные затылованные фрезы чаще всего изготавливаются с архимедовой или конволютной производящей поверхностью. Недостатком затылованных фрез является невозможность изготовления их длинными из-за малого диаметра затылующего круга и его низкой размерной стойкости.

Червячные фрезы сборной конструкции лишены этого недостатка, так как окончательная обработка задней поверхности осуществляется на операции резбошлифования кругом большого диаметра, имеющим высокую размерную стойкость. Однако не решен вопрос о производящей поверхности сборных червячных фрез.

Таким образом, повышение точности сборных червячных фрез за счет применения эвольвентной винтовой производящей поверхности является актуальной задачей.

**Цель исследований** – минимизация органических погрешностей эвольвентных зубчатых колес на основе применения сборных червячных фрез с эвольвентной винтовой производящей поверхностью.

### **Задачи исследований:**

- анализ производящих поверхностей фрез путем сравнения осевых и торцовых профилей архимедовых и конволютных винтовых поверхностей с эвольвентными;

- анализ технологических винтовых поверхностей сборных фрез на основе архимедовой и конволютной винтовых поверхностей с технологической винтовой поверхностью сборных фрез на основе эвольвентной винтовой поверхности путем сравнения осевых и торцовых профилей;

- решение прямой и обратной задач профилирования технологической винтовой поверхности шлифовальным кругом;

- аппроксимация массива точек в осевой плоскости шлифовального круга, полученного в результате численного решения прямой задачи профилирования.

**Методы исследований.** В работе применялись теоретические исследования и моделирование на ЭВМ. При выполнении теоретических исследований использовались основные положения теории машин и механизмов, теории проектирования и технологии изготовления режущего инструмента, технологии

машиностроения. При моделировании использовались основные положения аналитической и дифференциальной геометрии, векторной алгебры, матричного исчисления.

**Автор защищает:**

- аналитическую модель производящих и технологических винтовых поверхностей, учитывающую разноименные профили фрезы;

- методику решения прямой и обратной задач профилирования технологической винтовой поверхности шлифовальным кругом, учитывающую способ правки круга;

- методику прогнозирования степени приближения параметров точности получаемой производящей поверхности фрезы к теоретически точной и способ управления этой точностью;

- результаты анализа производящих и технологических винтовых поверхностей для сборных червячных фрез с поворотными зубчатыми рейками и вывод о том, что эти поверхности всегда являются нелинейчатыми, позволяющие оценить органические погрешности и погрешности при изготовлении сборной фрезы;

- вариант применения теории взаимного огибания при решении прямой и обратной задач профилирования, учитывающий нелинейчатость технологической поверхности.

**Научная новизна** диссертационной работы заключается в:

- установлении влияния технологии изготовления сборной червячной фрезы на форму ее производящей и технологической поверхностей и производящей поверхности шлифовального круга;

- доказательстве факта, что технологическая винтовая поверхность сборных фрез является нелинейчатой;

- разработке методики профилирования производящей поверхности шлифовального круга и доказательстве возможности прогнозирования степени приближения производящей поверхности сборной фрезы к эвольвентной.

**Практическая ценность работы.**

Разработан метод автоматизированного проектирования производящей поверхности шлифовального круга, позволяющий:

- определить производящую поверхность шлифовального круга, взаимногогибаемого с технологической поверхностью сборной червячной фрезы с эвольвентной производящей поверхностью;

- определить погрешности производящей поверхности фрезы при правке шлифовального круга по линии, отличающейся от расчетной.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы докладывались на ежегодных НТК профессорско-преподавательского состава ТулГУ (2005-2007 гг.), на Международной молодежной конференции «XXXI – XXXIII Гагаринские чтения» (г. Москва, 2005 – 2007 гг.), на Второй МНТК «Проектирование, технологическая подготовка и производство зубчатых передач» (г. Тула, 2005 г.), получен диплом участника выставки в Тульской торговой промышленной палате, получен диплом первой степени на Всероссийской НТК студентов и аспирантов «Современные средства обработки металлов и средства

их автоматизации» (г. Тула, 2008 г.), на Международной юбилейной НТК «Инструментальные системы машиностроительных производств», посвященной 105-летию со дня рождения С.С. Петрухина. Элементы работы выставлялась на первом Тульском Молодежном Инновационном Конвенте (г. Тула, 2009 г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 9 научных статей, в том числе 3 статьи в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ.

### **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, списка использованных источников из 63 наименований, общий объем составляет 146 страниц, включая 63 рисунка.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована научная новизна и кратко раскрыто содержание глав.

**В первой главе** проведен анализ известных способов проектирования и профилирования червячных фрез, с точки зрения минимизации их погрешностей, а также сформулирована цель и задачи исследования.

Сборные червячные фрезы с поворотными рейками широко применяются в зарубежной и мало применяются отечественной зубообработке.

Основными изготовителями червячных фрез с поворотными рейками являются европейские фирмы Klingelberg, Fette, Saazor (ФРГ), Samputensili (Италия), Deltal (Франция). В нашей стране сборные фрезы выпускаются небольшими партиями на ВАЗ, КАМАЗ и ООО «Принт».

Сборные фрезы имеют два принципиально различающиеся по технологии изготовления варианта конструкции.

Вариант конструкции с единым рабочим и технологическим корпусом характеризуется тем, что в качестве технологического корпуса используется рабочий корпус. Технологический червяк получается путем поворота корпуса на 180 градусов.

Второй вариант конструкции основан на использовании специального технологического корпуса для профилирования технологического червяка.

Поворот реек заключается в их угловом смещении относительно точки на вершине режущей кромки фрезы на величину заднего угла.

У фрез с единым корпусом при исходной точности, соответствующей классам АА и А, к концу эксплуатации точность снижается до классов А и В.

Более точны червячные фрезы, профилирование комплекта реек которых осуществляется в специальных технологических корпусах, т. е. второй вариант конструкции. При задних углах на вершине рейки 9 - 10° и соответствующих боковых кинематических углах 4 - 4,5°, даже при стачивании передней поверхности рейки на 10 мм, фрезы обеспечивают точность по классам АА или А. Это позволяет использовать их в качестве чистовых.

Профилированием червячных фрез занимались Грубин А.Н., Лихциер М.Б., Полоцкий М.С., Шишков В. А., Романов В. Ф., Колесов Н. В., Лашнев С. И.,

Семенченко И. И., Радзевич С. П., Цвис Ю. В., Фрайфельд И. А., Литвин Ф. Л., Цепков А. В., Фефилов Н. Д., Борискин О. И., Ничков А. Г., Шевченко А. Н., Иноземцев Г. Г., Иванов Н. И., Степанов Ю. С. и другие.

Во второй главе проведен анализ производящих и технологических винтовых поверхностей сборных червячных фрез путем сравнения осевых и торцовых профилей.

Уравнения осевых и торцовых профилей линейчатых производящих поверхностей сборных червячных фрез в системе координат  $0_0x_0y_0z_0$  приведены в таблице 1. Взаимное расположение системы  $0_0x_0y_0z_0$  и производящих поверхностей приведено на рисунке 1. Для эвольвентной винтовой поверхности  $r = r_b$ , для архимедовой  $r = 0$ , для конвольютной  $r = r_D$ .

Уравнения производящих поверхностей являются функциями двух переменных – длины образующей прямой  $u$  и угла поворота  $\vartheta$ . Уравнения осевого и торцового профилей, приведенные в таблице 1, зависят только от  $u$ .

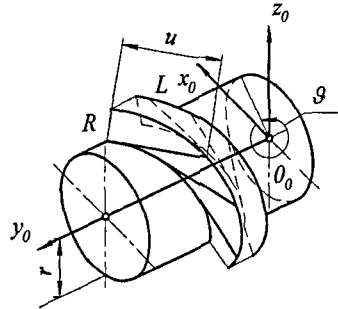


Рисунок 1 – Задание винтовой поверхности в системе координат инструмента.

Таблица 1

Уравнения профилей производящих поверхностей сборных фрез

| Архимедова винтовая поверхность  | Эвольвентная винтовая поверхность  | Конвольютная винтовая поверхность   |
|--|--|---|
| Обозначения  |  |   |
| $A = u \cos \alpha_x;$<br>$B = (u_0 - u) \sin \alpha_x + 0,5S_{x0};$<br>$C = B / p_0.$ | $A = u \cos \gamma_b;$<br>$A_0 = u_0 \cos \gamma_b;$<br>$B = (u_0 - u) \sin \gamma_b + 0,5S_{x0}.$<br>$C = \arctg(A / r_b);$<br>$C_0 = \arctg(A_0 / r_b);$<br>$D = (A_0 \mp B) / p_0.$ | $A = u \cos \alpha_{F1};$<br>$A_0 = u_0 \cos \alpha_{F1};$<br>$B = (u_0 - u) \sin \alpha_{F1} + 0,5S_{x0}.$<br>$C = \arctg(A / r_D);$<br>$C_0 = \arctg(A_0 / r_D);$<br>$D = (A_0 \mp B) / p_0.$ |
| Осевой профиль   |  |   |
| $x_{LRx0} = A,$<br>$y_{LRx0} = \pm B.$   | $x_{LRx0} = \sqrt{r_b^2 + A^2},$<br>$y_{LRx0} = p_0(\pm C - C_0) \pm B.$   | $x_{LRx0} = \sqrt{r_D^2 + A^2},$<br>$y_{LRx0} = p_0(\pm C - C_0) \pm B.$  |
| Торцовый профиль   |  |   |
| $x_{LRl0} = A \cos C,$<br>$z_{LRl0} = \pm A \sin C.$                                   | $x_{LRl0} = r_b \cos D \pm A \sin D,$<br>$z_{LRl0} = -r_b \sin D \pm A \cos D.$  | $x_{LRl0} = r_D \cos D \pm A \sin D,$<br>$z_{LRl0} = -r_D \sin D \pm A \cos D.$   |

В приведенных формулах  $p_0$  - винтовой параметр фрезы;  $S_{x0}$  - толщина витка фрезы на ее среднем диаметре; индекс «R» относится к правой стороне,

индекс «L» - к левой.

Для сравнения профилей производящих поверхностей определялись координаты расчетных точек осевых и торцовых профилей архимедовой и конвольютной производящих поверхностей по уравнениям таблицы 1. Через каждую расчетную точку была проведена нормаль к соответствующему профилю эвольвентной производящей поверхности. Погрешность профиля определялась как расстояние от расчетной точки до точки пересечения нормали с профилем эвольвентной поверхности (рисунок 2).

Осевые погрешности рассчитывались по формуле

$$\varepsilon_{LRxy} = \sqrt{(x_{LRx0y} - x_{LRxy})^2 + (y_{LRx0y} - y_{LRxy})^2}, \quad (1)$$

где  $x_{LRx0y}, y_{LRx0y}$  - координаты расчетной точки осевого профиля;  $x_{LRxy}, y_{LRxy}$  - координаты точки пересечения нормали с осевым профилем эвольвентной поверхности.

Торцовые погрешности определялись аналогично.

Величины погрешностей зависят от взаимного расположения расчетной точки и профиля эвольвентной поверхности:  $\varepsilon_{LRxy} > 0$  для расчетных точек, находящихся вне эвольвентной производящей поверхности;  $\varepsilon_{LRxy} < 0$  для расчетных точек, находящихся внутри эвольвентной поверхности (см. рисунок 2).

Погрешности осевых профилей приведены на рисунке 3.

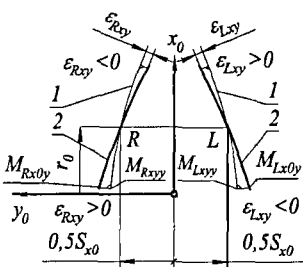


Рисунок 2 – Погрешности осевых профилей:

1 - эвольвентная поверхность; 2 - заменяющая поверхность.

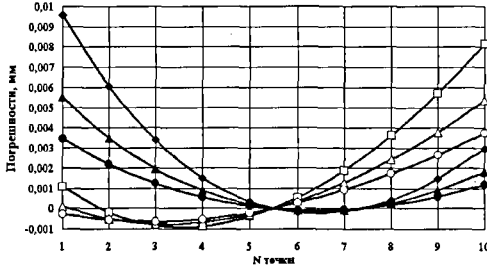


Рисунок 3 – Погрешности осевых профилей архимедовых и конвольютных поверхностей для  $m = 6, z = 1$ .

Уравнения технологических поверхностей сборных червячных фрез с архимедовой, эвольвентной и конвольютной производящими поверхностями определялись умножением уравнений режущих кромок фрезы на уравнения их движения с винтовым параметром вокруг оси технологической поверхности и представляют собой функции двух переменных – длины образующей прямой  $u$  и угла поворота  $\zeta_T$  точки режущей кромки вокруг оси технологической поверхности. Осевой и торцовый профили технологических поверхностей являются функциями переменной  $u$ .

Уравнения осевых и торцовых профилей технологических поверхностей сборных фрез с единым рабочим и технологическим корпусом, приведены в таблице 2, для фрез с технологическим корпусом – в таблице 3.

Уравнения профилей технологических поверхностей сборных фрез с единым рабочим и технологическим корпусом

| Архимедова винтовая поверхность   | Эвольвентная винтовая поверхность   | Конволютная винтовая поверхность  |
|---|---|---|
| Обозначения   |   |   |
| $D = \vartheta_{LR\gamma 0} + \zeta_{\tau};$<br>$E = \vartheta_{LR\gamma 0} - \vartheta_{LRx 0} + \zeta_{\tau};$<br>$E_x = \vartheta_{LR\gamma 0} - \vartheta_{LRx 0} + \zeta_{LRx};$<br>$F_x = \vartheta_{LR\gamma 0} + \zeta_{LRx};$<br>$F_l = \vartheta_{LR\gamma 0} + \zeta_{LRl};$ | $E = \vartheta_{LR\gamma 0} + \zeta_{\tau};$<br>$F = \vartheta_{LR\gamma 0} - \vartheta_{LRx 0} + \zeta_{\tau};$<br>$F_x = \vartheta_{LR\gamma 0} - \vartheta_{LRx 0} + \zeta_{LRx};$<br>$I_x = \vartheta_{LR\gamma 0} + \zeta_{LRx};$<br>$I_l = \vartheta_{LR\gamma 0} + \zeta_{LRl};$ |   |
| Осевой профиль  |   |   |
| $x_{LRx} = A \cos F_x +$<br>$+ 2c \cos \zeta_{LRx},$<br>$y_{LRx} = p_0 E_x \pm B,$  | $x_{LRx} = r_b \cos I_x \pm A \sin I_x +$<br>$+ 2c \cos \zeta_{LRx},$<br>$y_{LRx} = p_0 F_x \pm B,$   | $x_{LRx} = r_D \cos I_x \mp A \sin I_x +$<br>$+ 2c \cos \zeta_{LRx},$<br>$y_{LRx} = p_0 F_x \pm B,$   |
| Торцовый профиль  |   |   |
| $x_{LRl} = A \cos F_l +$<br>$+ 2c \cos \zeta_{LRl},$<br>$y_{LRl} = -A \sin F_l -$<br>$- 2c \sin \zeta_{LRl},$   | $x_{LRl} = r_b \cos I_l \pm A \sin I_l +$<br>$+ 2c \cos \zeta_{LRl},$<br>$y_{LRl} = -r_b \sin I_l \pm A \cos I_l -$<br>$- 2c \sin \zeta_{LRl},$   | $x_{LRl} = r_D \cos I_l \mp A \sin I_l +$<br>$+ 2c \cos \zeta_{LRl},$<br>$y_{LRl} = -r_D \sin I_l \mp A \cos I_l -$<br>$- 2c \sin \zeta_{LRl},$ |

Таблица 3

Уравнения профилей технологических поверхностей сборных фрез с технологическим корпусом

| Архимедова винтовая поверхность   | Эвольвентная винтовая поверхность   | Конволютная винтовая поверхность  |
|---|---|---|
| Осевой профиль  |   |   |
| $x_{LRx} = A \cos F_x +$<br>$+ a_x \cos \zeta_{LRx} +$<br>$+ a_z \sin \zeta_{LRx},$<br>$y_{LRx} = p_0 E_x \pm B,$   | $x_{LRx} = r_b \cos I_x \pm A \sin I_x +$<br>$+ a_x \cos \zeta_{LRx} + a_z \sin \zeta_{LRx},$<br>$y_{LRx} = p_0 F_x \pm B,$   | $x_{LRx} = r_D \cos I_x \mp A \sin I_x +$<br>$+ a_x \cos \zeta_{LRx} + a_z \sin \zeta_{LRx},$<br>$y_{LRx} = p_0 F_x \pm B,$   |
| Торцовый профиль  |   |   |
| $x_{LRl} = A \cos F_l +$<br>$+ a_x \cos \zeta_{LRl} +$<br>$+ a_z \sin \zeta_{LRl},$<br>$y_{LRl} = -A \sin F_l -$<br>$- a_x \sin \zeta_{LRl} +$<br>$+ a_z \cos \zeta_{LRl},$ | $x_{LRl} = r_b \cos I_l \pm A \sin I_l +$<br>$+ a_x \cos \zeta_{LRl} + a_z \sin \zeta_{LRl},$<br>$y_{LRl} = -r_b \sin I_l \pm A \cos I_l -$<br>$- a_x \sin \zeta_{LRl} + a_z \cos \zeta_{LRl},$ | $x_{LRl} = r_b \cos I_l \mp A \sin I_l +$<br>$+ a_x \cos \zeta_{LRl} + a_z \sin \zeta_{LRl},$<br>$y_{LRl} = -r_b \sin I_l \mp A \cos I_l -$<br>$- a_x \sin \zeta_{LRl} + a_z \cos \zeta_{LRl},$ |

Сравнение осевых профилей технологических винтовых поверхностей сборных фрез проводилось аналогично сравнению производящих поверхностей. Погрешности рассчитывались по формуле (1) и аналогично рисунку 2.

Погрешности для сборных фрез с единым рабочим и технологическим корпусом приведены на рисунке 4, а для фрез с технологическим корпусом – на рисунке 5.

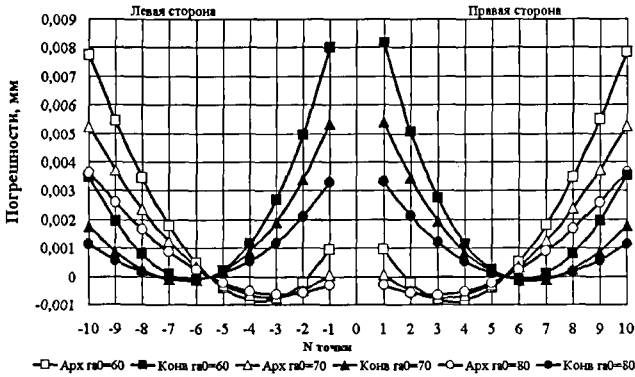


Рисунок 4 – Погрешности осевых профилей фрез с единым рабочим и технологическим корпусом при  $m = 6$ ,  $z = 1$ .

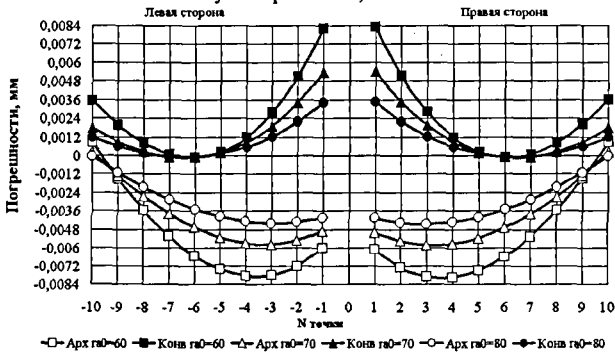


Рисунок 5 – Погрешности осевых профилей фрез с технологическим корпусом при  $m = 6$ ,  $z = 1$ .

Анализ технологических поверхностей показал, что они являются нелинейчатыми.

**В третьей главе** на основе теории взаимного огибания решены прямая и обратная задачи профилирования; разработаны основные положения расчета производящих поверхностей инструментов, формообразующих нелинейчатую технологическую винтовую поверхность. Также разработаны варианты аппроксимации массива точек в осевой плоскости шлифовального круга отрезками прямых линий, дугами окружностей и эллипсами.

Окончательная обработка технологической винтовой поверхности сборных фрез осуществляется шлифовальным кругом на резьбошлифовальном или токарно-затыловочном станке. В технологическом положении реек режущие

кромки и задняя поверхность располагаются на винтовой технологической поверхности.

Шлифовальный круг и технологическая винтовая поверхность контактируют в станочном зацеплении по пространственной кривой, называемой линией контакта. Осевой профиль шлифовального круга представляет собой проекцию линии контакта при ее движении по дуге окружности на осевую плоскость.

При определении точек контакта впадина технологической поверхности была рассечена совокупностью плоскостей, перпендикулярных оси шлифовального круга (рисунок 6). Первой точкой контакта была выбрана точка пересечения цилиндра впадины технологической поверхности с осью  $O_p z_p$  (рисунок 7). Во всех остальных плоскостях численными методами определялись точки линии пересечения технологической поверхности с соответствующей плоскостью. Точка  $M_{LRdk}$  с минимальным радиусом касательной окружности, центр которой находится на оси шлифовального круга, принималась за точку контакта (рисунок 8). Далее положение точки контакта уточнялось путем определения дополнительных точек между соседними точками  $M_{LRdk-1}$  и  $M_{LRdk+1}$ . Полученные точки контакта проецировались по дуге окружности на осевую плоскость шлифовального круга.

Секущие плоскости

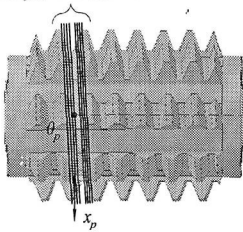


Рисунок 6 – Схема расположения секущих плоскостей.

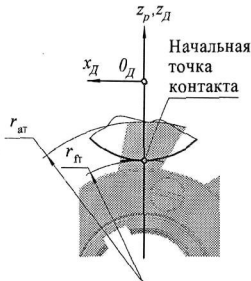


Рисунок 7 – Начальная точка контакта.

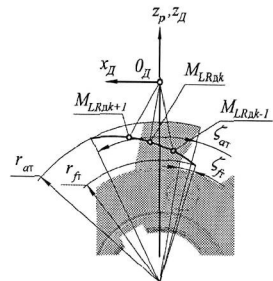


Рисунок 8 – Схема определения точки контакта.

Массив точек в осевой плоскости шлифовального круга аппроксимирован кривыми, по которым производилась правка шлифовального круга. В качестве аппроксимирующих кривых были выбраны прямые, дуги окружностей и эллипсы (рисунок 9).

Рассмотрены два варианта аппроксимации прямыми линиями: через точки основания и вершины профиля круга и через промежуточные точки.

Построение аппроксимирующих дуг окружностей осуществлялось по трем точкам: точке вершины осевого профиля шлифовального круга, точке основания и точке, расположенной между точкой вершины и точкой основания. Для построения аппроксимирующего эллипса необходимо выбрать на профиле 4 точки, однозначно определяющие координаты центра эллипса и длины большой и малой полуосей. Чтобы уменьшить количество точек для построения были связаны между собой малая и большая полуоси эллипса. Для построения эл-

липа были взяты точки на вершине и у основания осевого профиля шлифовально-го круга, а так же промежуточная точка, находящаяся между ними.

Точки контакта между аппроксимированным шлифовальным кругом и технологической винтовой поверхностью были определены численными методами из условия, что проходящая через точку контакта общая нормаль пересекает сопряженные оси винта относительного движения, называемые так же осями зацепления.

Координаты точек осевых и торцовых профилей производящих поверхностей сборных фрез с единым рабочим и технологическим корпусом определяются по формулам, приведенным в таблице 4, а для фрез с технологическим корпусом – в таблице 5.

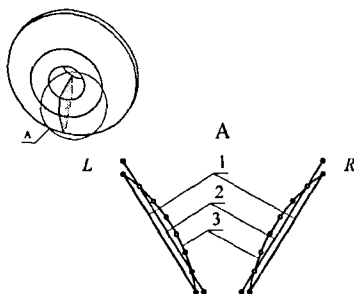


Рисунок 9 – Вариант аппроксимации массива точек в осевой плоскости шлифовального круга:

1 – прямые через точки на вершине и у основания осевого профиля; 2 – прямые через промежуточные точки; 3 – дуги окружности, эллипсы.

Таблица 4

Координаты осевого и торцового профилей производящих поверхностей сборных фрез с единым рабочим и технологическим корпусом

| Прямые  | Дуги окружностей                            | Эллипсы                                     |
|---|---|---|
| Обозначения   |   |   |
| $A_{ky} = y_{LRf} + (y_{LRa} - y_{LRf})t_{LRky}$ ;  | $A_{ky} = y_{LRc} + R_{LR} \cos t_{LRky}$ ; | $A_{ky} = y_{LRc} + a_{LR} \cos t_{LRky}$ ; |
| $B_{ky} = z_{LRf} + (z_{LRa} - z_{LRf})t_{LRky}$ ;  | $B_{ky} = z_{LRc} + R_{LR} \sin t_{LRky}$ ; | $B_{ky} = z_{LRc} + b_{LR} \sin t_{LRky}$ ; |
| $C_{xy} = \zeta_{LR\gamma y} + \zeta_{LRx0y}$ ;<br>$C_{ty} = \zeta_{LR\gamma y} + \zeta_{LRt0y}$ .  |   |   |
| Осевой профиль  |   |   |
| $\left. \begin{aligned} x_{LRx0y} &= (B_{ky} \cos \xi_{LRky} \cos \gamma_n - A_{ky} \sin \gamma_n) \cos C_{xy} + (A_{ky} \sin \xi_{LRky} + a_{WT}) \sin C_{xy} - \\ &- 2c \cos \zeta_{LRx0y}, \\ y_{LRx0y} &= B_{ky} \cos \xi_{LRky} \sin \gamma_n + A_{ky} \cos \gamma_n + p_0 C_{xy}. \end{aligned} \right\}$   |   |   |
| Торцовый профиль  |   |   |
| $\left. \begin{aligned} x_{LRt0y} &= (B_{ky} \cos \xi_{LRky} \cos \gamma_n - A_{ky} \sin \gamma_n) \cos C_{ty} + (A_{ky} \sin \xi_{LRky} + a_{WT}) \sin C_{ty} - \\ &- 2c \cos \zeta_{LRt0y}, \\ z_{LRt0y} &= -(B_{ky} \cos \xi_{LRky} \cos \gamma_n - A_{ky} \sin \gamma_n) \sin C_{ty} + (A_{ky} \sin \xi_{LRky} + a_{WT}) \cos C_{ty} + \\ &+ 2c \sin \zeta_{LRt0y}. \end{aligned} \right\}$ |   |   |

В приведенных формулах  $\gamma_n$  - угол скрещивания осей технологической поверхности и шлифовального круга;  $a_{WT}$  - межосевое расстояние в станочном

зацеплении.

Таблица 5

Координаты осевого и торцового профилей производящих поверхностей сборных фрез с технологическим корпусом

| Прямые  | Дуги окружностей | Эллипсы |
|---|------------------|---------|
| Осевой профиль  |                  |         |
| $x_{LRx0y} = (B_{ky} \cos \xi_{LRky} \cos \gamma_n - A_{ky} \sin \gamma_n) \cos C_{xy} + (A_{ky} \sin \xi_{LRky} + a_{WT}) \sin C_{xy} -$ $- a_x \cos \zeta_{LRx0y} - a_z \sin \zeta_{LRx0y},$  |                  |         |
| $y_{LRx0y} = B_{ky} \cos \xi_{LRky} \sin \gamma_n + A_{ky} \cos \gamma_n + p_0 C_{xy}.$   |                  |         |
| Торцовый профиль  |                  |         |
| $x_{LRl0y} = (B_{ky} \cos \xi_{LRky} \cos \gamma_n - A_{ky} \sin \gamma_n) \cos C_{ly} + (A_{ky} \sin \xi_{LRky} + a_{WT}) \sin C_{ly} -$ $- a_x \cos \zeta_{LRx0y} - a_z \sin \zeta_{LRx0y},$  |                  |         |
| $z_{LRl0y} = -(B_{ky} \cos \xi_{LRky} \cos \gamma_n - A_{ky} \sin \gamma_n) \sin C_{ly} + (A_{ky} \sin \xi_{LRky} + a_{WT}) \cos C_{ly} +$ $+ a_x \sin \zeta_{LRl0y} - a_z \cos \zeta_{LRl0y}.$ |                  |         |

Погрешности осевых профилей производящей поверхности относительно номинальной эвольвентной винтовой поверхности рассчитывались по формуле (1) и по рисунку 10. Профиль эвольвентной поверхности на рисунке 10 представлен линией.

Погрешности для сборных фрез с единым рабочим и технологическим корпусом приведены на рисунке 10, а для фрез с технологическим корпусом – на рисунке 11.

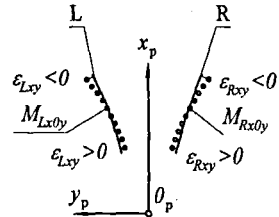


Рисунок 10 –Осевые погрешности.

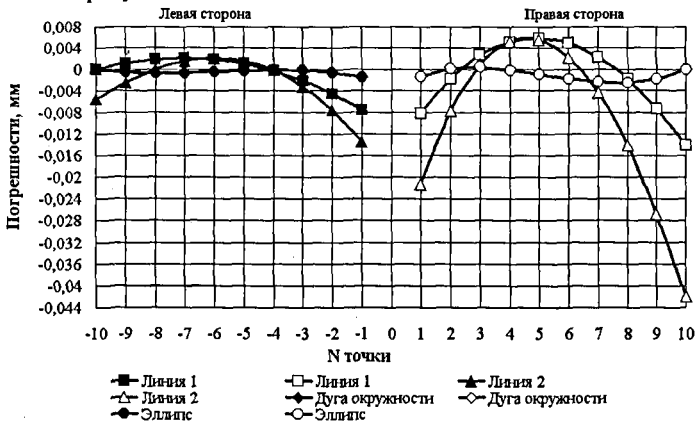


Рисунок 11 – Погрешности осевых профилей для фрез с единым рабочим и технологическим корпусом при  $m = 6, z = 1$ .

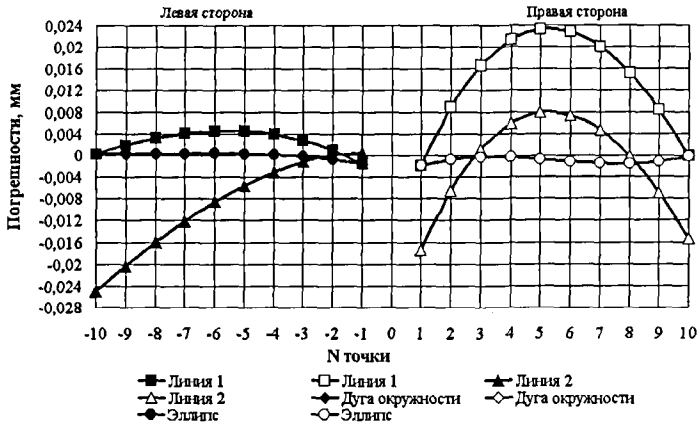


Рисунок 12 – Погрешности осевых профилей для фрез с технологическим корпусом при  $m = 6$ ,  $z = 1$ .

Погрешности торцовых профилей определялись аналогично.

На рисунках 11 и 12 «Линия 1» - погрешности при варианте аппроксимации прямой линией через точки на вершине и у основания профиля круга, «Линия 2» - погрешности при варианте аппроксимации прямой линией через промежуточные точки.

Расчеты производились для модулей 2 мм, 4 мм и 6 мм, одно-, двух- и трехзаходных фрез. Например, для однозаходных фрез с модулем 6 мм погрешности при варианте аппроксимации эллипсом незначительно отличаются от погрешностей при варианте аппроксимации дугой окружности.

Для уменьшения погрешностей производящей поверхности целесообразно увеличить количество участков на аппроксимирующей линии, соединяющих точки массива в осевой плоскости шлифовального круга или увеличить количество точек в массиве. При этом желательно обеспечить гладкое сопряжение участков на аппроксимирующей линии, кривизна которых не равна нулю. Это упрощает правку и контроль шлифовального круга.

В четвертой главе рассмотрены варианты реализации задачи профилирования задних поверхностей сборных червячных фрез с использованием оборудования с ЧПУ и пакетов программ для автоматизированного программирования систем ЧПУ; приведены способы получения поверхностей копиров и накатников, необходимых для профилирования дисковых шлифовальных кругов.

Правка шлифовального круга осуществляется на различном оборудовании.

На резьбошлифовальных станках с ЧПУ типа Matrix 5750 и Matrix 7050 фирмы «Matrix Machine Tool» правка осуществляется роликом с осажденным на рабочей поверхности слоем алмазного порошка.

На резьбошлифовальных станках типа 5K822B, 5M822B, 5D822B, 5A828 правка круга осуществляется алмазной иглой по копиям в устройстве для

правки. При движении рычагов рычажного механизма шупы перемещаются по поверхностям копиров, а алмазные иглы, установленные в осевой плоскости шлифовального круга, переносят профиль копира на шлифовальный круг. Кривые на копирах обрабатываются на фрезерном станке с ЧПУ, оптико-шлифовальном, плоскошлифовальном или профилишлифовальном станке.

Для разработки управляющей программы обработки копира точки профиля импортируются в САД-систему, соединяются кривыми и модель копира импортируется в САМ-систему, которая рассчитывает траекторию движения инструмента и формирует управляющую программу на языке программирования конкретной системы ЧПУ. В качестве САД-системы применялся графический редактор Компас-3D, а в качестве САМ-системы – SprutCAM.

При обработке копира на оптикошлифовальном станке его профиль проецируется на экран станка в масштабе 50:1 или 100:1. Кривая на копире последовательно шлифуется от точки к точке шлифовальным кругом, имеющим цилиндрическую, коническую или сложную форму. Контроль обработанной поверхности производится на микроскопе или контрольно-измерительной машине.

Переходные кривые на шлифовальных кругах накатываются роликом. В процессе накатывания шлифовальный круг и ролик, прижатые друг к другу, медленно вращаются. Режущие кромки представляют собой радиальные прорезы в ролике, изготовленном из более прочного материала, чем круг, и располагаются с переменным угловым шагом, чтобы одна и та же режущая кромка обрабатывала новые участки круга.

Контроль фрезы осуществляется по режущей кромке на инструментальном микроскопе в отраженном свете или на контрольно-измерительной машине.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В диссертационной работе решена научная задача, направленная на повышение точности сборных червячных фрез за счет применения эвольвентной винтовой производящей поверхности, при этом впервые установлено, что технологическая винтовая поверхность сборных фрез является нелинейчатой и показана возможность прогнозирования степени приближения производящей поверхности сборной фрезы к эвольвентной.

1. Анализ литературных источников показал, что точность сборных фрез, обеспечиваемая на операции шлифования технологической винтовой поверхности фрезы, зависит от способа правки шлифовального круга. Методика профилирования круга должна учитывать погрешности производящей поверхности, возникающие при правке круга по линии, отличающейся от расчетной.

2. Анализ графиков показал, что погрешности профилей производящих и технологических винтовых поверхностей возрастают при увеличении модуля и количества заходов и убывают при увеличении радиуса вершин производящей поверхности.

3. При проектировании сборных фрез для обработки цилиндрических колес производящую поверхность целесообразно принимать эвольвентной, тем самым, минимизируются органические погрешности.

4. Установлено, что при формообразовании технологических винтовых поверхностей аппроксимированными шлифовальными кругами производящие поверхности таких фрез будут иметь расхождение с эвольвентной поверхностью. Например, для однозаходной фрезы с модулем 6 мм и варианта аппроксимации прямыми линиями через точки у вершины и у основания профиля круга полученные погрешности для фрез с единым рабочим и технологическим корпусом не превышают 20 мкм.

Для варианта аппроксимации прямыми линиями через промежуточные точки погрешности не превышают 48 мкм.

Для варианта аппроксимации дугами окружностей получены погрешности не более 3 мкм.

Для варианта аппроксимации эллипсами получены погрешности, не превышающие 3 мкм.

5. Анализ результатов расчета погрешностей производящих поверхностей сборных фрез с технологическим корпусом по предложенной методике показал, что, например, для однозаходной фрезы с модулем 6 мм и варианта аппроксимации прямыми линиями через точки у вершины и у основания погрешности не превышают 24,8 мкм.

Для варианта аппроксимации прямыми линиями через промежуточные точки получены погрешности, не превышающие 25 мкм.

Для варианта аппроксимации дугами окружностей получены погрешности, не превышающие 2 мкм.

Для варианта аппроксимации эллипсами получены не более 2 мкм.

6. Применение САД- и САМ-систем в технологической подготовке операции правки круга позволяет осуществить переход от аппроксимации круга к его интерполяции, что повышает класс точности фрезы.

7. Для уменьшения погрешностей производящей поверхности целесообразно увеличить количество участков на аппроксимирующей линии, соединяющих точки массива в осевой плоскости шлифовального круга или увеличить количество точек в массиве. При этом желательно обеспечить гладкое сопряжение участков на аппроксимирующей линии, кривизна которых не равна нулю.

8. Червячные фрезы, изготовленные с применением разработанных методик, использованы в ОАО «Станкотехника», г. Тула.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Колобаев А.В. Моделирование винтовых поверхностей // Лучшие научные работы студентов и аспирантов технологического факультета: сб. ст. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. – с. 82 – 83.

2. Колобаев А.В. Применение кинематической теории огибающей семейства поверхностей в проектировании режущих инструментов // XXXI Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной конференции. Москва, 5-9 апреля 2005г. М.: МАТИ, 2005. – с. 133.

3. Колобаев А.В. Определение кинематических углов для сборных фрез с поворотными рейками // Известия ТулГУ. Серия. Машиноведение, системы приводов и деталей машин. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. С. 170 – 177.

4. Колобаев А.В. Определение профиля дискового инструмента для обработки винтовой поверхности эвольвентного червяка // XXXII Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной конференции. Москва, 4-8 апреля 2006г. М.: МАТИ, 2006. Т. 5, с. 22 – 23.

5. Колобаев А.В., Феофилов Н.Д. Сборные червячные фрезы на основе эвольвентного червяка // Известия ОрелГТУ. Машиностроение. Прогрессостроение. 2006. №2. С. 41 – 46.

6. Болдин А.В., Феофилов Н.Д., Колобаев А.В. Нарезание зубчатых мелко модульных реек. // Известия ТулГУ. Сер. Технология машиностроения. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2006. С. 217 – 219.

7. Колобаев А.В. Применение численных методов в проектировании режущих инструментов для обработки винтовых поверхностей // XXXIII Гагаринские чтения. Тезисы докладов Международной молодежной конференции. М.: МАТИ, 2007. Т. 5, с. 22 – 23.

8. Колобаев А.В., Мацкевич А.В. Исследование стойкости червячных фрез. Сборник тезисов Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Современные средства обработки металлов и средства их автоматизации». Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – с. 127 – 128.

9. Колобаев А.В., Лобанов Н.В. Сборные червячные фрезы на основе архимедова производящего червяка // Вестник ТулГУ. Сер. Инструментальные и метрологические системы. Материалы Международной юбилейной научно-технической конференции «Инструментальные системы машиностроительных производств», посвященной 105-летию со дня рождения С.С. Петрухина, 29-31 октября 2008 г. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2008. – с. 197 – 200.

Изд. Лиц. ЛР № 020300 от 12.02.97. Подписано в печать «23» апреля 2010

Формат бумаги 60x84  $\frac{1}{16}$ . Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,8. Тираж 100 экз. Заказ 063

Тульский государственный университет. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92.

Отпечатано в Издательстве ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95.