



005011433

На правах рукописи

ЧЕРДАНЦЕВ ПАВЕЛ ОЛЕГОВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЦЕЛЬНЫХ НЕПЕРЕТАЧИВАЕМЫХ  
ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ПУТЁМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИХ РЕЖУЩИХ ЗУБЬЕВ

Специальности: 05.02.08 – Технология машиностроения,  
05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-  
технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

16 ОЕВ 2012

Барнаул – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Хоменко Валерий Андреевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Рахимянов Харис Магсуманович

кандидат технических наук, доцент  
Балашов Александр Владимирович

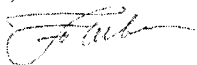
Ведущее предприятие: ХК «Алтайталь» (г. Барнаул)

Защита диссертации состоится «24» февраля 2012 г. в 12 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.004.01 при ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова» по адресу: 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46; факс: 8-(3852)-290-765; e-mail: yuoshevtsov@mail.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова».

Автореферат разослан «23» января 2012 г.

Учёный секретарь диссертационного совета,  
кандидат технических наук, доцент



Ю. О. Шевцов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современных экономических условиях одной из важнейших проблем машиностроения является снижение себестоимости изделий в целом, и операций механической обработки в частности, при условии обеспечения требуемого качества. Одним из путей снижения себестоимости изготовления изделий является повышение стойкости режущего инструмента.

Значение эвольвентных зубчатых передач в машиностроении весьма велико. При производстве зубчатых колёс до 60 % от общей трудоёмкости затрачивается на нарезание зубьев. Среди методов зубонарезания наибольшее распространение получило зубофрезерование как наиболее производительный по сравнению с прочими. Однако зубофрезерованию присущ ряд недостатков, к которым можно отнести высокую стоимость инструмента, его низкую стойкость несмотря на невысокие скорости резания и подачи, необходимость в трудоёмких наладочных работах и в наличии заточного участка для его восстановления, повышающих себестоимость обработки зубчатых колёс. Поэтому повышение стойкости зуборезного инструмента и снижение затрат на его изготовление является важнейшими факторами снижения затрат на операциях зубофрезерования.

В то же время на современном этапе развития для машиностроительной отрасли характерно увеличение доли предприятий малого и среднего бизнеса. На таких предприятиях, занимающихся металлообработкой, как правило, отсутствуют заточной и инструментальный участки, требующие наличия дорогостоящего оборудования. С точки зрения снижения себестоимости продукции для них выгоднее приобретать готовый режущий инструмент, работающий без переточек до полного износа.

Работа без переточек может быть экономически эффективной только при использовании червячных фрез со значительно большей стойкостью по сравнению со стандартными. Зубья стандартных фрез работают в тяжёлых условиях несвободного резания, срезая Г- или П-образные слои, работа зубьев происходит в неблагоприятных условиях из-за малости задних углов на боковых режущих кромках, что обусловлено соображениями сохранения профиля зуба при возможно большем числе переточек. Поэтому характерной тенденцией совершенствования червячных фрез является применение конструкций со схемами резания, обеспечивающими раздельное стружкообразование. Однако, как правило, в существующих технических решениях, в частности при использовании наиболее перспективной прогрессивной схемы резания, при которой зубья, завышенные и уменьшенные по толщине, чередуются через один с зубьями стандартного профиля, обеспечение высокой стойкости инструмента осуществляется в ущерб качеству обработки, что вызывает необходимость введения в технологический процесс дополнительных операций, например, операцию шевингования. При этом себестоимость обработки увеличивается, снижая положительный эффект от использования таких червячных фрез.

Таким образом, проблема создания червячных фрез, предназначенных для работы без переточек и обладающих высокой стойкостью, обеспечивающих требуемое качество обработки, со стоимостью меньшей или сопоставимой со

стоимостью стандартных фрез, является актуальной. Её решение позволит значительно снизить себестоимость обработки зубчатых колёс.

В этой связи сформулирована **цель работы** – повышение стойкости червячных фрез путём совершенствования геометрических параметров их режущих зубьев и назначения рациональных режимных параметров зубофрезерных операций.

#### **Задачи исследований:**

- определить пути повышения стойкости неперетачиваемых червячных фрез и червячных фрез с прогрессивной схемой резания;
- провести анализ процесса формирования впадины зубчатого колеса червячными фрезами с целью определения параметров коррекции профиля высотных зубьев;
- разработать способ формирования задней поверхности высотных и профилирующих зубьев неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания;
- установить зависимость стойкости неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания от режимов резания;
- предложить рекомендации по проектированию и технологии изготовления неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания;
- разработать рекомендации по назначению рациональных режимных параметров зубофрезерных операций с использованием неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания разработанной конструкции;
- внедрить результаты работы на промышленных предприятиях.

**Методы исследования.** В работе использовались положения научных основ технологии машиностроения, теории резания металлов, теории эвольвентной зубчатой передачи, математической теории планирования эксперимента, математического моделирования, программирования. Подтверждение теоретических положений обеспечивалось экспериментальными лабораторными исследованиями.

#### **Научная новизна** заключается в:

- разработанной математической модели формообразования зубчатых поверхностей червячными неперетачиваемыми фрезами с прогрессивной схемой резания;
- установлении расчётных зависимостей для определения параметров установки шлифовального круга относительно фрезы при формировании задней поверхности её зубьев от геометрических параметров зубьев, исключаящих их подрезание;
- установлении взаимосвязи между параметрами режимов резания и стойкостью неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания разработанной конструкции.

#### **Практическая ценность** состоит из:

- рекомендаций по проектированию червячных фрез с прогрессивной схемой резания, позволяющих увеличить стойкость инструмента за счёт увеличения задних углов и назначения параметров коррекции высотных зубьев, обеспечивающих раздельное стружкообразование;

– методики проектирования технологических операций формирования задней поверхности неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания разработанной конструкции;

– рекомендаций для назначения рациональных режимных параметров резания операции зубофрезерования неперетачиваемыми червячными фрезами с прогрессивной схемой резания разработанной конструкции.

**Реализация результатов исследований.** Неперетачиваемые червячные фрезы с прогрессивной схемой резания были внедрены в технологический процесс обработки зубчатых колёс на ОАО «Барнаултрансмаш». Суммарный ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет 105 тысяч рублей.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы публиковались и докладывались на Всероссийской научно-технической конференции «Наука и молодежь» (г. Барнаул, 2004), Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых учёных "Наука. Технологии. Инновации" (г. Новосибирск, 2005), международной научно-технической конференции «СТСМ-2005» (г. Барнаул, 2005), VI-VII городских научно-практических конференциях «Молодежь – Барнаулу» (г. Барнаул, 2004 – 2005), III, IV, VII всероссийских научно-практических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Барнаул, 2006, 2007, 2010), на совместных научных семинарах кафедр «Технология автоматизированных производств», «Общая технология машиностроения», «Сельскохозяйственное машиностроение» и «Менеджмент технологий» (АлтГТУ им И. И. Ползунова) в 2004 – 2011 гг.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 печатных работ. Из них 1 статья опубликована в издании, рекомендованном ВАК РФ, 10 тезисов докладов, 1 свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объём работы.** Диссертационная работа содержит введение, 4 главы, общие выводы, список литературы и приложения. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 7 таблиц, 31 рисунок, список литературы из 81 наименования.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** изложено современное состояние проблемы, обоснована актуальность выбранной темы исследования, сформулированы цель и задачи работы. Обозначены основные пути снижения себестоимости обработки зубчатых венцов.

**Выполненный в первой главе** анализ работы стандартных червячных фрез позволил установить причины их низкой стойкости. Во-первых, каждый зуб, прорезающий впадину колеса, работает двумя или тремя кромками, срезая Г- или П-образные в поперечном сечении слои, то есть работает по схеме несвободного резания. При этом максимальный износ имеют задние поверхности в уголках выходной режущей кромки, что связано с торможением свободного схода стружки и взаимодействием стружек, снимаемых вершинной и двумя боковыми кромками.

Во-вторых, низкая стойкость червячных фрез связана с тем, что работа боковых кромок режущих зубьев происходит в неблагоприятных условиях резания

из-за малости задних углов. Увеличение их не представляется возможным из соображений обеспечения условий многократной переточки изношенных червячных фрез, затылованных по архимедовой спирали.

Исследования таких учёных, как С. Н. Медведицков, Н. Я. Смольников, В. Ф. Чурбаков, Е. М. Болотина, Т. Танимото, Р. Озава, Н. Тарумаса, показывают, что при изменении схемы резания со стандартной на прогрессивную уменьшаются напряжения при усадке стружки, срезаемой боковыми кромками, изменяется направление схода стружки, что ведёт увеличению стойкости в 2-3 раза. В то же время авторами отмечается ряд недостатков, характерных для прогрессивной схемы резания: во-первых, это повышенный износ высотных зубьев; во-вторых, увеличение огранки нарезаемых зубьев за счёт двукратного уменьшения числа профилирующих зубьев; в-третьих, не решаются проблемы увеличения задних углов на боковых режущих кромках.

Литературный анализ показал, что проблема увеличения задних углов на боковых режущих кромках может быть решена с использованием конструкций неперетачиваемых червячных фрез. С нашей точки зрения, конструкция, описанная в патенте США №5033239, представляет наибольший интерес. Поскольку она предназначена для работы без переточек, то представляется возможным увеличить задний угол на вершинной кромке зубьев и, как следствие, боковые задние углы, что улучшит условия резания на боковых кромках и тем самым приведёт к увеличению стойкости инструмента. Другим достоинством такой конструкции является увеличенное число зубьев по окружности.

На наш взгляд, перспективной представляется комбинированная конструкция неперетачиваемых червячных фрез, работающих по прогрессивной схеме резания. За счёт отдельного стружкообразования, уменьшения толщины срезаемых зубьями слоёв и увеличенных боковых задних углов такая фреза по стойкости должна существенно превосходить стандартную, что, учитывая работу без переточек, особенно актуально. В то же время, за счёт увеличенного числа зубьев по окружности, может быть исключён один из основных недостатков фрез с прогрессивной схемой резания – увеличение огранки нарезаемых зубьев. Однако при этом для фрез предлагаемой конструкции необходимо решить вопрос формирования задних поверхностей разнопрофильных зубьев и назначения рациональных режимов резания.

Разработка и исследование конструкции комбинированных неперетачиваемых червячных фрез, работающих по прогрессивной схеме резания, а также вопросы назначения рациональных режимов резания при их эксплуатации положены в основу предлагаемой работы.

Для выяснения причин повышенного износа высотных зубьев **во второй главе** был проанализирован процесс формирования впадины зубчатого колеса червячной фрезой с прогрессивной схемой резания (рисунок 1), что позволило сделать следующие выводы. Во-первых, профилирующие зубья работают в лучших условиях, чем высотные. Несмотря на то, что они снимают П-образные слои (имеются в виду зубья первых двух витков, наиболее нагруженных), стружка по периметру имеет почти одинаковую толщину, либо на вершинной кромке стружка тоньше. Таким образом, отклонение стружки в сторону выходной кромки

незначительно, зубья работают при относительно невысоких деформациях срезаемых слоёв, несмотря на то, что их боковые кромки снимают более толстые слои по сравнению со стандартными фрезами. Высотные же зубья срезают Г-образные слои, причём стружка на вершинной кромке имеет значительно большую толщину по сравнению со стружкой на входной боковой кромке. Следовательно, на последней будут относительно большие деформации сдвига и, возможно, смятия, что и приводит к большему, чем на профильных зубьях, износу.

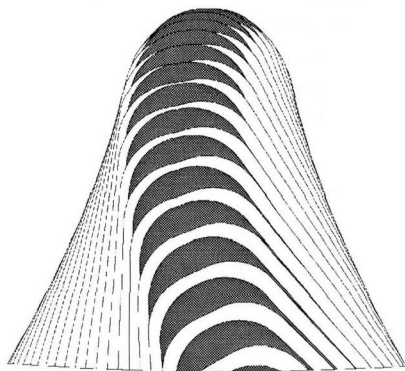


Рисунок 1 – Схема формирования впадины колеса червячной фрезой с прогрессивной схемой резания. Модуль  $m = 3,5$  мм, число зубьев колеса – 36, число реек фрезы – 10

Во-вторых, можно предположить, что величины коррекции зубьев несколько занижены, так как не происходит разделения стружки. В пользу этого предположения говорит и то, что согласно существующей методике назначения величин коррекции зубьев определённому диапазону модулей (в моделируемом случае модули 2 – 4 мм) назначаются

одинаковые величины заужения на сторону и завышения зубьев. Очевидно, что это будет давать разный эффект для модуля  $m = 2$  мм (большой эффект) и, например, модуля  $m = 3,5$  мм (моделируемый случай, меньший эффект).

Известно, что величины коррекции зубьев должны быть больше либо равными максимальной толщины соответствующих срезаемых слоёв. Поэтому следует более дифференцированно отнестись к назначению параметров этих величин, и тем самым создать более благоприятные условия резания, что положительно скажется на стойкости червячных фрез. С этой целью была разработана математическая модель максимальных толщин слоёв, срезаемых боковой и вершинной кромками (рисунок 2).

На основании результатов моделирования процесса формирования впадины червячной фрезой с обычной схемой резания за максимальную толщину срезаемого вершинной кромкой слоя  $a_b$  принято расстояние, измеренное по перпендикуляру к прямолинейному участку вершинной кромки  $(i-1)$ -го зуба, опущенному из его середины, до прямолинейного участка следа вершинной кромки  $i$ -го зуба (рисунок 2, б), где  $i$  – число зубьев червячной фрезы, формирующих впадину с входной стороны до межосевого перпендикуляра фреза-заготовка (рисунок 2, а). За максимальную толщину срезаемого вершинной кромкой слоя  $a_b$  принято расстояние от точки F сопряжения радиусного и входного бокового участков следа  $i$ -го зуба до прямой  $n$ , на которой находится входная режущая кромка  $(i-1)$ -го зуба (рисунок 1).

Математическая модель имеет вид:

$$a_b = \frac{(i-1) \cdot \Delta \cdot \sin \xi + r_f}{\cos \xi} - r_f, \quad (1)$$

где вспомогательные величины

$$\xi = \frac{2\pi}{z \cdot z_0}; \quad (2)$$

$$\Delta = \frac{\pi m}{z_0}; \quad (3)$$

$$i = \frac{z_0 \sqrt{z(h_a^* + h_f^*) + h_a^{*2} - h_f^{*2}}}{\pi}, \quad (4)$$

здесь  $r_f$  – радиус окружности впадин нарезаемого колеса;  $z$  – число зубьев нарезаемого колеса;  $z_0$  – число реек червячной фрезы;  $m$  – модуль нарезаемого колеса;  $h_a^*$  и  $h_f^*$  – коэффициенты высоты головки и ножки зуба соответственно;

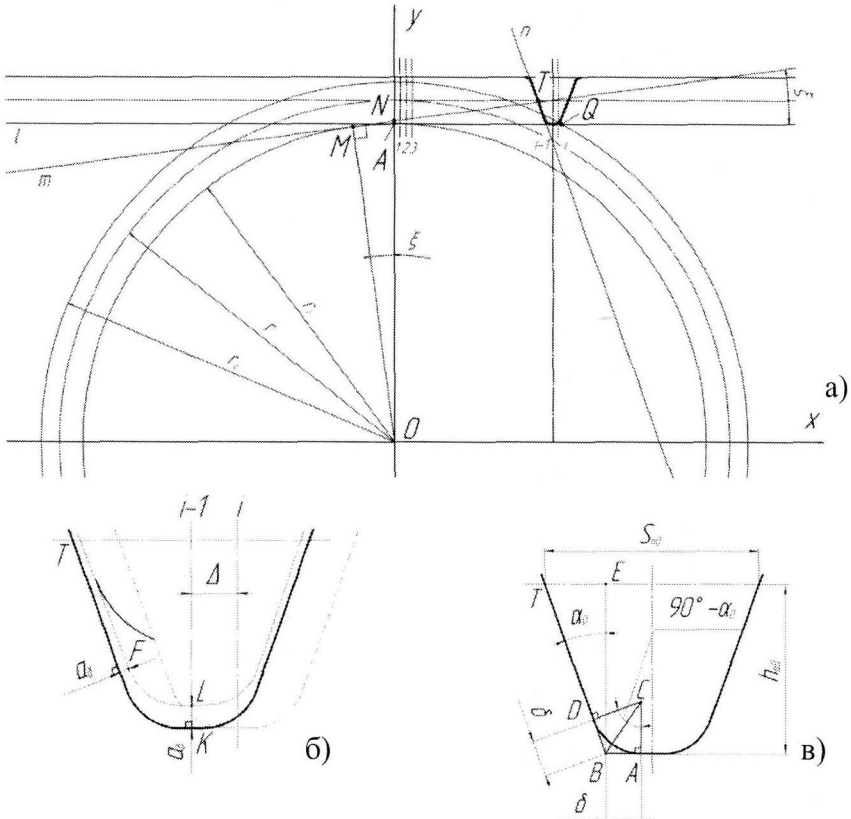


Рисунок 2 – Схемы к математической модели максимальных толщин слоёв, срезаемых боковой и вершинной кромками

$$a_0 = \frac{|y_T - y_F - k(x_T - x_F)|}{\sqrt{k^2 + 1}}, \quad (5)$$

где вспомогательные величины

$$k = \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_0\right) = -\operatorname{ctg}\alpha_0; \quad (6)$$

$$\begin{cases} x_T = (i-1) \cdot \Delta - \frac{S_{n0}}{2}; \\ y_T = r_f + h_a; \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} x_D = i \cdot \Delta - \frac{S_{n0}}{2} + h_{a0} \cdot \operatorname{tg}\alpha_0 - \rho_{a0} \cdot (1 - \sin\alpha_0); \\ y_D = r_f + \rho_{a0} \cdot (1 - \sin\alpha_0); \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_F = x_D \cdot \cos \xi - y_D \cdot \sin \xi; \\ y_F = x_D \cdot \sin \xi + y_D \cdot \cos \xi, \end{cases} \quad (9)$$

здесь  $S_{n0}$  – ширина зуба фрезы на делительном диаметре;  $h_a$  – высота головки зуба фрезы;  $\rho_{a0}$  – радиус переходной кривой у головки зуба;  $\alpha_0$  – угол профиля зуба инструментальной рейки.

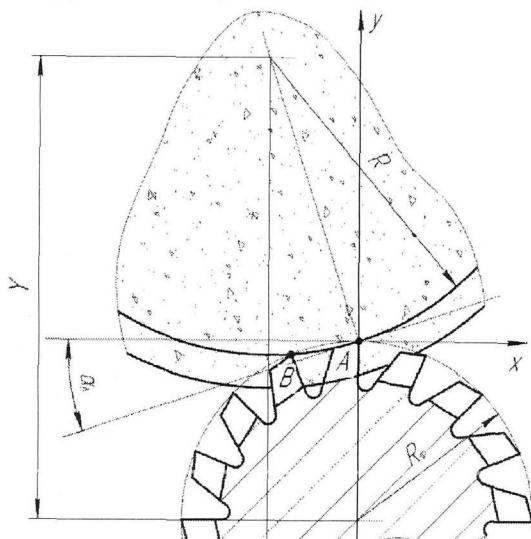


Рисунок 3 – Схема к определению параметров установки шлифовального круга относительно заготовки червячной фрезы

Результаты моделирования показывают, что оптимальные величины коррекции профиля высотного зуба пропорционально зависят от модуля нарезаемого колеса. При назначении рассчитанных параметров коррекции обеспечивается разделение потоков стружки при работе высотных и профилирующих зубьев.

Полагая величины коррекции высотных зубьев назначенными, был рассмотрен процесс формирования задней поверхности зубьев фрезы предлагаемой конструкции. Задняя поверхность зубьев обрабатывается на шлифовально-затыловочном станке. С целью определения параметров установки шлифовального круга

относительно обрабатываемой червячной фрезы, в предлагаемой работе рассмотрен процесс формирования задней поверхности её зубьев (рисунок 3).

В результате установлено, что выражения для определения радиуса заплечика шлифовального круга  $R$  и параметров его установки  $X$  и  $Y$  будут иметь одинаковый вид при формировании как задней поверхности профилирующего зуба,

так и формирование задней поверхности высотного зуба; различными будут лишь значения параметров, входящих в выражения:

$$R^2 = X^2 + (y_A - Y)^2; Y = b - X \operatorname{ctg} \alpha; \quad (10)$$

$$X = \frac{x_B^2 + y_B^2 - y_A^2 - 2b(y_B - y_A)}{2(x_B - (y_B - y_A) \operatorname{ctg} \alpha)}. \quad (11)$$

Вспомогательные параметры – координаты точек А и В в выбранной системе координат (рисунок 3) – для случая формирования задней поверхности профилирующего зуба будут иметь вид:

$$x_A = 0; y_A = R_\Phi; x_B = -(R_\Phi + e_b) \sin \frac{2\pi}{z_0}; y_B = (R_\Phi + e_b) \cos \frac{2\pi}{z_0}, \quad (12)$$

а для случая формирования задней поверхности высотного зуба:

$$x_A = 0; y_A = R_\Phi + e_b; x_B = -R_\Phi \sin \frac{2\pi}{z_0}; y_B = R_\Phi \cos \frac{2\pi}{z_0}. \quad (13)$$

**Третья глава** посвящена экспериментальной проверке результатов исследования. С целью оценки увеличения стойкости непереключаемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания по сравнению со стандартными, а также установления зависимости стойкости от режимов резания, необходимых для разработки рекомендаций по их эксплуатации, проведены две серии экспериментов.

Поскольку вдоль витка износ по задним поверхностям зубьев червячной фрезы неравномерен, оценить увеличение стойкости фрезы при изменении задних углов и параметров коррекции зубьев целесообразнее на примере рассмотрения увеличения стойкости наиболее изнашиваемого зуба. Таким образом, целесообразно моделировать процесс резания одного (N-го) из зубьев червячной фрезы, подвергнувшегося наибольшему износу.

Разработана следующая модель процесса зубофрезерования. В качестве режущего инструмента в модели используется дисковая однозубая фасонная фреза, профиль зуба и геометрические параметры которой соответствуют профилю зуба и геометрическим параметрам червячной фрезы. В качестве заготовки используется цилиндр с предварительно нарезанными продольными канавками, имитирующими впадину зубчатого колеса, остающуюся после работы предыдущего (N – 1)-го зуба.

Модель была проверена на адекватность. Для этого на первой стадии фрезой стандартной конструкции было осуществлено зубофрезерование пакета заготовок из стали 45 на режимах, назначенных согласно существующим нормативам, исходя из фактической стойкости 240 минут (скорость резания – 35 м/мин, подача – 2мм/об.ст.). После этого был измерен износ по задним поверхностям зубьев, установлено, какой зуб червячной фрезы подвергается наибольшему износу (зуб №19 от начала витка, износ 0,94 мм при критерии износа 1 мм). На второй стадии был изготовлен цилиндр с продольными канавками, имитирующими впадину, остающуюся после работы зуба, предшествующего работе наиболее изнашиваемого зуба. Третья стадия заключалась в обработке подготовленного цилиндра дисковой однозубой фасонной фрезой, профиль зуба и геометрические параметры которой соответствуют аналогичным параметрам червячной фрезы. Режимы резания

соответствовали режимам при зубофрезеровании на первой стадии. После 240 минут работы износ зуба модели составил 0,85 мм, а величины, соответствующей максимальному износу зуба червячной фрезы (0,94 мм) достиг после 265 минут работы. Разность в величине износа зуба модели по сравнению с износом зуба червячной фрезы по истечении 240 минут работы составила 9,6%, а по стойкости до момента достижения износа в 0,94 мм – 10,4%, что позволяет считать предлагаемую модель адекватной реальному процессу.

Первая серия экспериментов заключалась во фрезеровании фрезой-моделью с зубьями предлагаемого профиля, отличающимися геометрией режущего клина. Режимы резания при моделировании назначались в соответствии с режимами при зубофрезеровании. При этом измерялось время, в течение которого износ по задней поверхности зубьев достигал той критической величины, что и в эксперименте, осуществлённом на этапе проверки модели на адекватность. По результатам этой серии экспериментов установлены геометрические параметры, обеспечивающие наибольшую стойкость инструмента.

Результаты экспериментальных исследований следующие: средняя стойкость зубьев с задним углом на вершинной кромке  $15^\circ$  составила 850 минут, что в 3,54 раза выше стойкости зуба стандартной червячной фрезы между переточками при тех же режимах резания; стойкость зуба с задним углом на вершинной кромке  $18^\circ$  – 930 минут (в 3,86 раза выше стойкости стандартной фрезы); с задним углом на вершинной кромке  $20^\circ$  – 890 минут (в 3,71 раза выше стойкости стандартной фрезы).

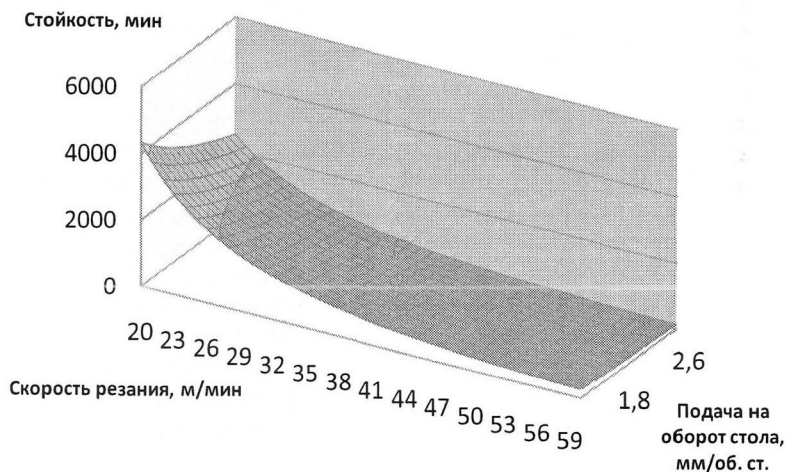


Рисунок 4 – Зависимость стойкости неперетачиваемых червячных фрез от режимов резания

Вторая серия экспериментов, проведённая как полный факторный эксперимент  $2^2$ , позволила установить зависимость стойкости предлагаемых

червячных фрез от режимов резания (скорости резания и подачи на оборот стола) в виде степенной модели:

$$T = 15520693,753 \cdot v^{-2,5456} \cdot S^{-0,9574} \quad (14)$$

Задний угол на вершинной кромке зубьев при этом был назначен равным  $18^\circ$ , как обеспечивающий наибольшую стойкость по результатам первой серии экспериментов. На рисунке 4 полученная зависимость представлена графически.

В четвёртой главе работы изложены рекомендации по проектированию червячных фрез разработанной конструкции. При этом расчёт величин коррекции высотных зубьев был реализован программно на основе предложенной математической модели максимальных толщин снимаемых слоёв (рисунок 5).

Кроме того, на основе типового технологического процесса изготовления червячных фрез был разработан технологический процесс изготовления червячных фрез разработанной конструкции. Изменения коснулись двух затыловочных операций – черновой и чистовой.

На основании полученной зависимости стойкости от скорости резания и подачи на оборот стола разработаны рекомендации по назначению рациональных режимов резания зубофрезерных операций с использованием в качестве режущего инструмента неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания.

С этой целью укрупнённо рассмотрена структура себестоимости зубофрезерной операции. При этом затраты, не зависящие от режимов резания, не учитывались, так как от их величины вопрос назначения режимов резания (скорости резания  $v$  и подачи на оборот стола  $S$ ) не зависит. Таким образом, себестоимость ( $C_{\text{сб}}$ ) операции складывается из затрат на режущий инструмент ( $Z_{\text{рн}}$ ), затрат на оплату труда рабочего ( $Z_{\text{тн}}$ ) и затрат на электроэнергию ( $Z_{\text{э}}$ ):

$$C_{\text{сб}} = Z_{\text{рн}} + Z_{\text{тн}} + Z_{\text{э}} \quad (15)$$

или, учитывая факторы, оказывающие влияние на эти затраты:

$$C_{\text{сб}} = k \cdot B \cdot \frac{\pi \cdot D_e \cdot z}{1000} \cdot \left( \frac{C_{\text{рн}}}{C} \cdot v^{-\alpha-1} \cdot S^{-\beta-1} + v^{-1} \cdot S^{-1} \cdot (C_{\text{тн}} + P \cdot \frac{C_{\text{э}}}{60}) \right), \quad (16)$$

где  $C$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  – коэффициенты степенной зависимости стойкости от режимов резания,  $k$  – коэффициент, учитывающий глубину врезания, перебег и число заготовок в пакете,  $B$  – ширина нарезаемого венца,  $D_e$  – диаметр червячной фрезы,  $z$  – число зубьев нарезаемого колеса,  $C_{\text{рн}}$  – стоимость рабочего времени (ставка рабочего при повременной системе оплаты труда), руб/мин,  $C_{\text{э}}$  – тариф на электроэнергию,



Рисунок 5 – Экранная форма программного обеспечения для расчёта параметров снимаемых слоёв (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614543)

руб/(кВт·ч),  $C_{р/и}$  – стоимость режущего инструмента, руб,  $P$  – мощность электродвигателя станка, кВт.

Анализ представленной зависимости показывает, что себестоимость зубофрезерной операции монотонно убывает с увеличением подачи на оборот стола (рисунок 6, а) и имеет экстремум, зависящий от скорости резания (рисунок 6, б).

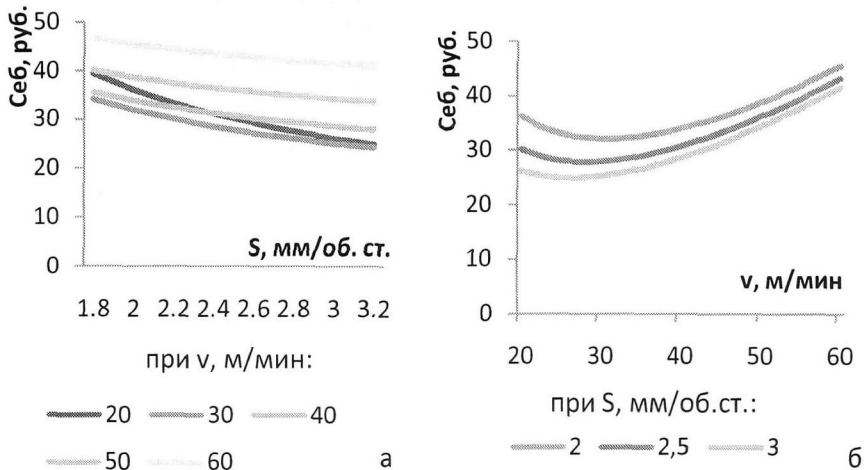


Рисунок 6 – Зависимость себестоимости зубофрезерной операции от подачи на оборот стола при значениях скорости резания 20; 30; 40; 50; 60 м/мин (а) и скорости резания при значениях подачи на оборот стола 2; 2,5 и 3 мм/об. ст. (б)

В диссертационной работе рассмотрены два случая: работа на станках со ступенчатым и бесступенчатым регулированием. При бесступенчатом регулировании без учёта ограничивающих факторов подача  $S$  должна назначаться максимально возможной, а скорость резания  $v$  – определяться из следующего выражения:

$$v = \left( \frac{-C \cdot (C_{р/и} + P \cdot \frac{C_{v/ч}}{60}) \cdot S^\beta}{C_{р/и} \cdot (\alpha + 1)} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (17)$$

При ступенчатом регулировании режимы резания назначаются согласно разработанному алгоритму, реализующему последовательный перебор возможных значений скоростей резания и подач на оборот стола с целью определения значений, обеспечивающих минимальную себестоимость.

Неперетачиваемые червячные фрезы с прогрессивной схемой резания прошли производственные испытания на ОАО ХК «Барнаултрансмаш», о чём имеется соответствующий акт внедрения. Режимы резания были назначены согласно предложенным рекомендациям: подача  $s=3$  мм/об. ст., скорость резания

$v=26$  м/мин, с целью подтвердить адекватность полученной степенной зависимости стойкости от режимов резания. Стойкость червячных фрез составила 1240 мин, что на 8,6% меньше расчётной (1356 мин); это позволяет говорить о достаточной адекватности предложенной степенной модели реальному процессу. При этом обеспечивались все технические требования, предъявляемые к обрабатываемому зубчатому колесу.

Экономический эффект при использовании разработанных неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания достигается за счёт следующих мероприятий по технологическому обеспечению снижения себестоимости обработки зубчатых венцов: снижение стоимости изготовления инструмента при формировании задней поверхности зубьев шлифованием; оптимизация режимов резания комбинированными червячными фрезами по критерию себестоимости обработки; исключения из технологического процесса шевингования при обработке колёс до 7 степени точности включительно; сокращения доли вспомогательного времени при зубофрезеровании; исключения затрат на переточку инструмента, содержание заточного участка и дублирование инструмента.

Ожидаемый экономический эффект составил 105000 рублей.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основании анализа взаимодействия зубьев червячных фрез с нарезаемым колесом при различных схемах резания обоснована перспективность использования для зубонарезания неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания.

2. Разработана математическая модель формирования впадины зубчатого колеса, позволяющая рассчитывать оптимальные величины коррекции профиля высотного зуба с учётом модуля нарезаемого колеса, его числа зубьев и числа реек червячной фрезы.

3. Разработана программа для ЭВМ № 2010614543 «Расчёт величин коррекций высотных зубьев червячных фрез с прогрессивной схемой резания (SkyJack)»

4. Разработана методика расчёта параметров установки шлифовального круга при формировании задней поверхности зубьев неперетачиваемой червячной фрезы с прогрессивной схемой резания, обеспечивающих максимизацию задних углов на режущих кромках и исключаяющих подрезание кромок зуба, соседнего с заточиваемым.

5. Установлено влияние величины заднего угла на вершинной кромке зубьев неперетачиваемой червячной фрезы с прогрессивной схемой резания на его стойкость: при увеличении заднего угла до  $15 - 20^\circ$  стойкость возрастает в 3,54 – 3,86 раза по сравнению со стандартными фрезами, оптимальное значение заднего угла –  $18^\circ$ .

6. Разработаны рекомендации по проектированию неперетачиваемых червячных фрез с прогрессивной схемой резания и корректировке технологического процесса их изготовления.

7. Предложена методика назначения рациональных режимов резания, учитывающая взаимосвязь себестоимости операции зубофрезерования со скоростью резания и подачей на оборот стола, а также особенности зуборезного оборудования.

8. Производственные испытания опытных фрез на ОАО ХК «Барнаултрансмаш» подтвердили перспективность их эксплуатации. Ожидаемый экономический эффект составил 105000 рублей.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Черданцев П. О. Методика расчёта величин коррекций высотных зубьев червячных фрез с прогрессивной схемой резания / П. О. Черданцев // Ползуновский вестник. – 2009. – №1-2. – С. 159-163.

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614543 «Расчёт величин коррекций высотных зубьев червячных фрез с прогрессивной схемой резания (SkyJack)», 2010.

3. Черданцев П. О. Перспективы создания САПР червячных фрез / П. О. Черданцев, Н. П. Щербаков // Современные технологические системы в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конференции. – Барнаул, 2003. С. 31-33.

4. Черданцев П. О. Червячные фрезы с прогрессивной схемой резания / П. О. Черданцев // Молодёжь – Барнаулу: материалы научно-практической конференции. – Барнаул: Аз бука, 2004. – С. 319-320.

5. Черданцев П. О. Моделирование процесса нарезания зубчатых колёс червячными фрезами с прогрессивной схемой резания / П. О. Черданцев, В. А. Оменко // Современные технологические системы в машиностроении: материалы междунар. науч.-техн. конф. / Алт. гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова. – Барнаул, 005. – Ч. 2 : Фундаментальные и прикладные исследования по приоритетным направлениям развития науки и техники. – С. 146-148.

6. Черданцев П. О. Червячные фрезы с прогрессивной схемой резания / П. О. Черданцев, Н. П. Щербаков // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 3-ей серос. науч.-практ. конференции. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2005. – С. 31-33.

8. Черданцев П. О. Совершенствование геометрии червячных фрез с прогрессивной схемой резания / П. О. Черданцев // Наука. Технологии. Инновации: материалы всероссийской научной конференции молодых учёных: в 7 ч. Ч. 7. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. – С. 34-36.

9. Черданцев П. О. Математическая модель максимальной толщины резаемых червячной фрезой слоёв / П. О. Черданцев // Молодёжь – Барнаулу: материалы научно-практической конференции. – Барнаул, 2006. – С. 385-387.

10. Черданцев П. О. Конструкция непереключаемых червячных фрез / П. О. Черданцев, А. О. Черданцев // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 7-ой серос. науч.-практ. конференции. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2009. – С. 119-121.

11. Осипов С. А. Неперетачиваемые червячные фрезы с прогрессивной схемой резания / С. А. Осипов, П. О. Черданцев // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 8-ой Всерос. науч.-практ. конференции. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – С. 123-124.

12. Черданцев П. О. Моделирование процесса резания зубом червячной фрезы / П. О. Черданцев, О. А. Барсукова // Проблемы повышения эффективности металлообработки в промышленности на современном этапе: материалы 8-ой Всерос. науч.-практ. конференции. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – С. 140-141.

Подписано в печать 20.01.2012. Формат 60x84 1/16.

Печать – цифровая. Усл.п.л. 0,93.

Тираж 100 экз. Заказ 2012 - 27

Отпечатано в типографии АлтГТУ,  
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46  
тел.: (8–3852) 29–09–48

Лицензия на полиграфическую деятельность  
ПЛД №28–35 от 15.07.97 г.