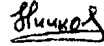


На правах рукописи

Ничков Андрей Владимирович



ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗНОСА
ЧЕРВЯЧНЫХ МОДУЛЬНЫХ ФРЕЗ С ЗАБОРНЫМ КОНУСОМ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМАХ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

Специальность 05.03.01 - Технологии и оборудование
механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург 2004

Работа выполнена на кафедрах «Электронное машиностроение»
и «Металлорежущие станки и инструменты»
Уральского государственного технического университета - УПИ

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Жуков Ю.Н.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Шаламов В.Г.
кандидат технических наук, доцент
Закураев В.В.

Ведущая организация - ФГУП «Уралтрансмаш», г.Екатеринбург

Защита состоится 18 июня 2004г. в 14— часов на заседании диссертационного
совета Д 212.285.10 при Уральском государственном техническом университе-
те-УПИ, ауд. М-323.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке УГТУ-УПИ

Ваш отзыв на автореферат, заверенный печатью организации, просим выслать
по адресу: 620002, г.Екатеринбург, ул.Мира, 19, УГТУ-УПИ, ученому секретарю
совета университета, тел. (343) 375-45-74.

Автореферат разослан 30.04. 2004 г.

Ученый секретарь диссертационного совета



Чечулин Ю.Б.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

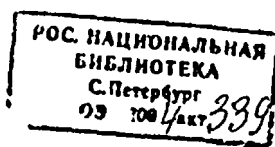
Актуальность работы. При нарезании цилиндрических зубчатых колес червячными модульными фрезами нередко применяют фрезы с заборным конусом. Выбор заборного конуса на входной стороне червячной фрезы обосновывают необходимостью устранения перегрузки первого вступающего в резание зуба фрезы из-за недостаточной ее длины, а на выходной - для избежания измельчения значительного числа срезаемых слоев и возникающих из-за этого вибраций станочной системы. В том и другом случае при выборе параметров заборного конуса не уделяется достаточного внимания таким важнейшим эксплуатационным характеристикам процесса зубофрезерования, как износ и стойкость, что нередко приводит к нерациональному использованию режущих способностей червячных фрез с заборным конусом.

Поэтому актуальным является комплексное исследование этих фрез не только с позиций избежания перегрузки зубьев червячной фрезы или устранения причин измельчения срезов на выходной ее стороне, но и оптимизации угла, длины и местоположения заборного конуса при зубонарезании в связи с износом в разных технологических схемах зубофрезерования, выбора оптимального варианта врезания фрезы в заготовку (осевое, радиальное, тангенциальное, радиально-осевое, радиально-тангенциальное, диагональное), возможности применения осевых смещений фрезы и циклов обработки зубчатых колес с целью более полного использования режущих способностей червячной фрезы, конструктивного исполнения заборной части фрезы не только в виде конуса, но и другой формы, например, в виде тора, влияния параметров нарезаемого колеса на выбор заборного конуса и технологической схемы зубофрезерования.

Цель работы. Исследование влияния заборного конуса червячной фрезы на ее износ в разных технологических схемах зубофрезерования и оптимизация его параметров (угла и положения) для обеспечения эффективного использования режущих способностей инструмента в зависимости от параметров нарезаемого колеса и технологических возможностей станка.

Методы и средства исследования. Поставленные в работе задачи решены на основе теоретических и экспериментальных исследований с применением ЭВМ. При этом использованы соответствующие разделы теории резания, технологии машиностроения, теории огибающих, аналитической геометрии, дифференциального и интегрального исчисления, вычислительной математики. Экспериментальные исследования проводились в лабораторных и заводских условиях на зубофрезерных станках с применением современной измерительной аппаратуры.

Научная новизна работы заключается в методике и полученных на ее основе результатах исследования износа червячных модульных фрез с заборным конусом, позволивших вскрыть внутреннюю картину загрузки и износа зубьев фрезы, установить последовательность определения оптимальных параметров



заборного конуса и способы его рационального использования за счет осевых смещений и циклов обработки в разных технологических схемах зубофрезерования с учетом параметров нарезаемого зубчатого колеса и технологических особенностей зубофрезерного станка, что создает возможность управления распределением износа по зубьям фрезы и повышения коэффициента использования ее режущих способностей.

Практическая ценность работы заключается в методическом, математическом и программном обеспечении исследования износа червячных модульных фрез с заборным конусом, алгоритме определения оптимальных параметров заборного конуса и способов его использования в каждом конкретном случае нарезания зубчатого колеса, исходя из ограничений со стороны фрезы или станка, что позволяет правильно выбрать режимы, избежать катастрофического износа, снизить расход инструмента, повысить производительность и экономичность процесса зубофрезерования.

Реализация результатов работы. Результаты работы внедрены на ФГУП «Уралтрансмаш» и ОАО «Завод бурового и металлургического оборудования». Методическое, математическое и программное обеспечение исследования износа червячных модульных фрез с заборным конусом используется в дипломных проектах студентов УГТУ-УПИ.

Апробация работы. Результаты работы доложены на 6 научно-технических конференциях, научно-техническом совете ФГУП «Уралтрансмаш», объединенном семинаре кафедр «Электронное машиностроение», «Металлорежущие станки и инструменты» и «Технология машиностроения» УГТУ-УПИ, в их числе: **II** Межвузовская отраслевая НТК «Автоматизация и прогрессивные технологии», Новоуральск, 1999; Всероссийская НТК «Аэрокосмическая техника и высокие технологии-2001», Пермь, 2001; **III** Межотраслевая НТК «Автоматизация и прогрессивные технологии», Новоуральск, 2002; Всероссийская НТК «Аэрокосмическая техника и высокие технологии-2002», Пермь, 2002; НТК молодых ученых УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2003; Международная НТК «Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства», Волгоград, 2003.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, основных результатов работы и выводов, списка литературы и приложений, содержит 220 страниц машинописного текста, в том числе 43 рисунка, 21 таблицу, список литературы из 180 наименований и приложения на 22 страницах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность проблемы *исследования износа червячных модульных фрез с заборной частью в виде конуса и тора в разных технологических схемах зубофрезерования с целью выбора оптимальных параметров заборной части фрезы и условий ее рациональной эксплуатации.*

1. Состояние вопроса. Цели и задачи исследования. В общем объеме металлообработки нарезание зубчатых колес занимает значительную долю, поэтому неудивительно, что исследованию процесса зубофрезерования посвящено большое количество работ, направленных на повышение производительности, качества зубообработки и стойкости инструмента путем совершенствования конструкции, геометрии червячных фрез и условий их рационального использования. В то же время анализ этих работ показал следующее:

- несмотря на широкое применение червячных фрез с заборным конусом, исследования, посвященные им, малочисленны, носят, как правило, частный характер, выполнены практически с позиций устранения перегрузки первого вступающего в резание зуба на входном участке фрезы или избежания измельчения срезов на выходном ее участке без учета влияния параметров заборного конуса на износ зубьев, что нередко приводит к отрицательным последствиям применения таких фрез;

- приводимый в работах диапазон изменения угла заборного конуса весьма широк, но отсутствует достаточное обоснование выбора его значения в каждом конкретном случае нарезания зубчатого колеса;

- в комбинированных схемах зубофрезерования, когда направление подачи в период врезания и последующего профилирования зубьев колеса изменяется, рассматриваются частные случаи в основном для червячных фрез без заборного конуса;

- отсутствуют результаты сравнительных исследований износа червячных фрез с заборным конусом и без него;

- отмечаемый в некоторых работах всплеск износа зубьев червячной фрезы на участке сопряжения цилиндрической части фрезы с конусной, предлагается снизить путем закругления этого участка, но не приводится математический аппарат для анализа происходящих при этом изменений загрузки и износа зубьев фрезы;

- отсутствует программное обеспечение для исследования износа червячных фрез с заборным конусом при различном сочетании параметров фрезы, ее заборного конуса, нарезаемого колеса, режимов резания, технологической схемы зубофрезерования; это же относится и к фрезе с заборной частью иной формы, например, тороидальной;

- износ зубьев червячной фрезы при нарезании зубчатого колеса зависит от размеров срезаемых ими слоев, которые в свою очередь зависят от параметров фрезы, нарезаемого колеса, технологической схемы зубофрезерования, режимов

резания (подачи, глубины резания), что дает методическую направленность проведения исследования износа червячных фрез с заборным конусом в разных условиях его использования.

На основании результатов анализа литературных данных для достижения сформулированной в работе цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методическое, математическое и программное обеспечение для исследования процесса нарезания цилиндрических зубчатых колес червячными фрезами с заборным конусом в разных технологических схемах зубофрезерования;
- исследовать влияние параметров нарезаемого зубчатого колеса (z_1 , β_1 , материал) и технологической схемы зубофрезерования на выбор оптимальной величины заборного конуса;
- исследовать способы врезания червячной фрезы с заборным конусом в заготовку (осевое, радиальное, тангенциальное, радиально-осевое, радиально-тангенциальное, диагональное);
- исследовать износ зубьев червячной фрезы с заборной частью в виде тора;
- оценить влияние инструментального материала на некоторые эксплуатационные характеристики процесса зубофрезерования;
- исследовать возможность управления износом зубьев червячной фрезы с заборным конусом путем применения осевых смещений фрезы и циклов обработки зубчатых колес с целью более полного использования ее режущих способностей;
- во всех сериях опытов провести сравнительные исследования износа червячных фрез с заборным конусом и без него;
- провести экспериментальную проверку результатов выполненного исследования путем нарезания на зубофрезерных станках зубчатых колес червячными фрезами с заборным конусом и без него;
- дать научно обоснованные рекомендации по оптимальному применению червячных фрез с заборным конусом;
- внедрить полученные результаты исследования в промышленность.

2. Методика исследования износа зубьев червячной модульной фрезы с заборным конусом. В основу исследования износа зубьев червячных фрез с заборным конусом при нарезании цилиндрических зубчатых колес положено следующее: размеры слоев, срезаемых зубьями червячной фрезы, различны и зависят от параметров нарезаемого зубчатого колеса (модуль m , число z_1 и угол β_1 наклона зубьев), червячной фрезы (модуль, число заходов z_{10} , число стружечных канавок z_0 , диаметр D_{ao} , параметры заборного конуса), режима резания (подача, глубина); размеры срезаемых слоев наряду со скоростью резания, материалом заготовки и инструмента, геометрией режущих лезвий инструмента предопределяют износ зубьев червячной фрезы и в конечном итоге вид графика

распределения износа по зубьям червячной фрезы, который используется для получения эксплуатационных характеристик процесса зубофрезерования и оптимизации его параметров.

Для определения размеров срезаемых слоев удобно использовать методику, в основе которой лежит понятие о зоне резания (контактном поле) как области пространства, в пределах которой происходит резание вершинными кромками зубьев червячной фрезы. Для определения износа зуба червячной фрезы в зависимости от размера срезаемого им слоя в данной работе использованы результаты исследований, в которых установлены зависимости износа зуба от размеров и формы срезаемого слоя, скорости резания, геометрии режущих лезвий инструмента, обрабатываемого материала.

Для решения этих задач, связанных с определением зоны резания, размеров срезаемых слоев и износа зубьев червячной фрезы с заборным конусом и без него для указанных ранее вариантов нарезания цилиндрических зубчатых колес разработано методическое, математическое и программное обеспечение с использованием теории резания, теории огибающих, аналитической геометрии, дифференциального и интегрального исчисления, вычислительной математики.

На рис.1 представлена одна из зон резания для обобщенного случая нарезания зубчатого колеса червячной фрезой с заборным конусом, когда включены подачи осевая s_o , радиальная s_p и тангенциальная s_T . Зона резания для фрезы с конусом ограничена контуром *орбитально* (пунктирной линией показана зона резания фрезой без конуса; штрих-пунктирной - фрезой с заборной частью в виде тора). Для определения этих линий зоны резания необходимы уравнения поверхностей, в результате пересечения которых они получаются. Этими поверхностями являются цилиндрический и конический участки фрезы, окружность, по которой они сопрягаются, их огибающие поверхности, образующиеся на зубчатом колесе при его согласованном с фрезой движении, а также наружный цилиндр, верхний и нижний торцы нарезаемого зубчатого колеса.

Запишем сначала уравнения конической поверхности и ее огибающей. Уравнение семейства поверхностей конуса при согласованном относительном движении фрезы и нарезаемого зубчатого колеса имеет вид

$$F = \pm \sqrt{\left\{ \left(x \sin \alpha + y \cos \alpha \right) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right\}^2 + \left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right)^2} - k \left\{ \left(x \sin \alpha + y \cos \alpha \right) \cos \varphi - \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \sin \varphi - \left[l_k + L_1 + s_T \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right] \right\} = 0. \quad (1)$$

Продифференцировав уравнение (1) по параметру α , получим

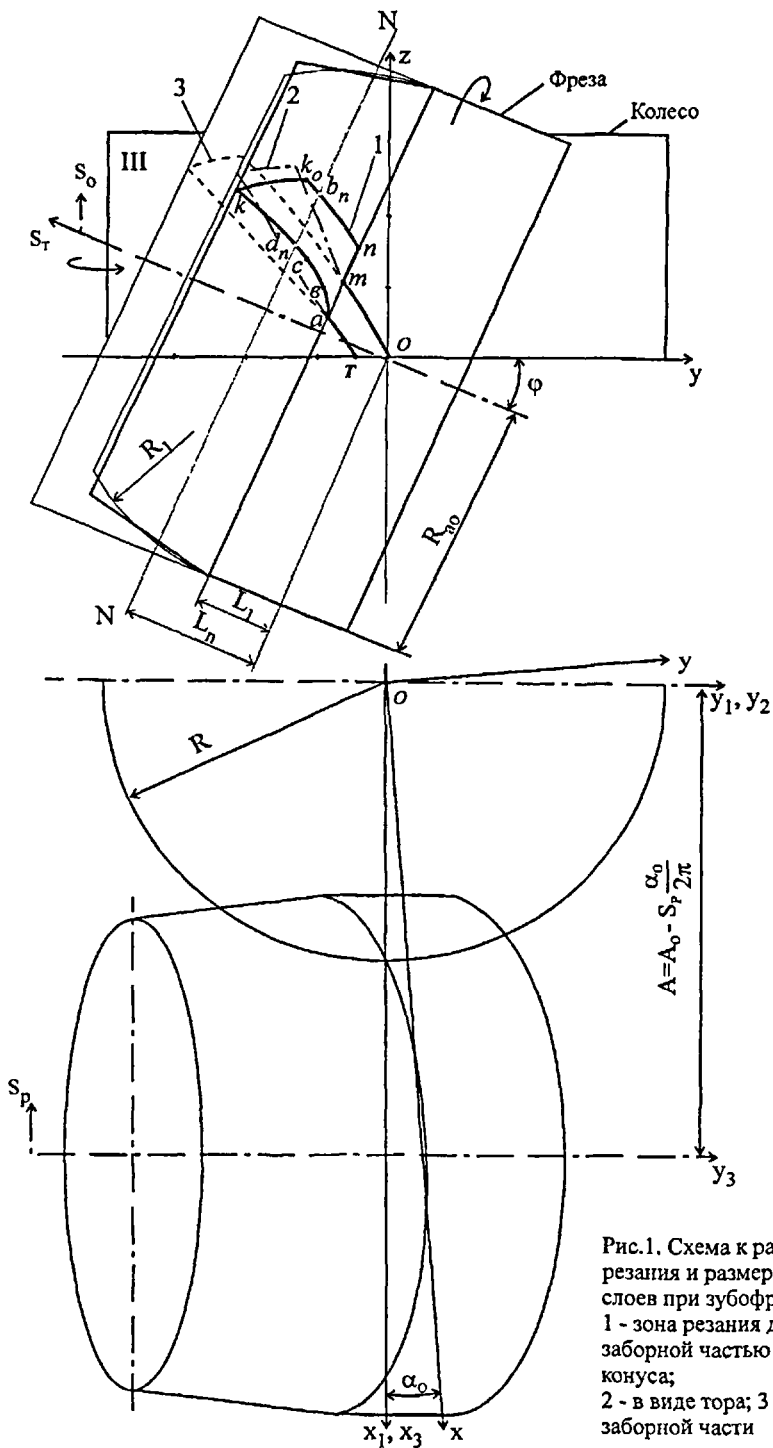


Рис.1. Схема к расчету зоны резания и размеров срезаемых слоев при зубофрезеровании:
 1 - зона резания для фрезы с заборной частью в виде конуса;
 2 - в виде тора; 3 - фреза без заборной части

$$F_{\alpha} = \frac{\left[(x \sin \alpha + y \cos \alpha) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right] \cdot \left[(x \cos \alpha - y \sin \alpha) \sin \varphi + s_o \frac{\cos \varphi}{2\pi} \right]}{\sqrt{\left\{ \left(x \sin \alpha + y \cos \alpha \right) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right\}^2 + \left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right)^2}} + \frac{\left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cdot \left(-x \sin \alpha - y \cos \alpha + \frac{s_p}{2\pi} \right)}{\sqrt{\left\{ \left(x \sin \alpha + y \cos \alpha \right) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right\}^2 + \left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right)^2}} - k \left[(x \cos \alpha - y \sin \alpha) \cos \varphi - \frac{s_o}{2\pi} \sin \varphi - \frac{s_T}{2\pi} \right] = 0, \quad (2)$$

где α - угловой параметр; φ - угол установки фрезы; N - количество оборотов колеса; A_o - начальное межосевое расстояние; s_o, s_p, s_T - соответственно осевая, радиальная и тангенциальная подачи; $k=R_{ao}/l_k$ - уклон; R_{ao} - наружный радиус червячной фрезы; l_k - высота конуса; L_l - расстояние от межосевого перпендикуляра (МОП) до основания конуса.

Система уравнений (1) и (2) описывает огибающую поверхность конуса при относительном движении червячной фрезы и нарезаемого зубчатого колеса.

Уравнения семейства поверхностей цилиндрического участка червячной фрезы и его огибающей поверхности получим из уравнений (1) и (2) как частный случай конуса при $l_k \rightarrow \infty$.

Огибающую поверхность окружности сопряжения конуса с цилиндром фрезы получим из совместного решения уравнения (1) вращающегося цилиндра фрезы и уравнения (3) плоскости, в которой лежит эта окружность.

$$y \cos \varphi - \left[z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right] \sin \varphi + \left[L_1 + s_T \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right] = 0 \quad (3)$$

Для определения границ зоны резания необходимо располагать уравнением наружного цилиндра нарезаемого колеса:

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (4)$$

где R - наружный радиус колеса. Кроме того, необходимы уравнения его торцов:

$$\text{верхнего } z=Z_n, \quad (5)$$

$$\text{нижнего } z=Z_n. \quad (6)$$

Уравнения (1)-(6) позволяют определить границы зоны резания при нарезании зубчатого колеса червячной фрезой как без заборного конуса, так и с заборным конусом на входе и/или выходе при любом сочетании параметров зубофрезерования. Используем эти уравнения для определения границ зоны резания на рис.1, ограниченной контуром *отабсккнмо*. В этом контуре линия *табск* получается при пересечении соответствующих участков огибающей поверхности, образованной на предыдущем обороте колеса с цилиндрической и конической поверхностями червячной фрезы; *кк_о* - при пересечении наружного цилиндра заготовки и конической поверхности фрезы; *к_{нмо}* - линия пересечения наруж-

ных поверхностей фрезы в двух ее последовательных положениях за период поворота колеса на угол α_2 при повороте фрезы на угол между двумя соседними по витку зубьями; OT - линия пересечения наружной поверхности червячной фрезы с торцом колеса. Уравнение для определения α_2 имеет вид:

$$\alpha_x = 2 \frac{\pi}{z_o} - mz_{10} \sin(\gamma_{mo} - \varphi) / [z_o R_{ao} \cos \varphi \cos(\gamma_{mo} + \lambda_{mo}) \cdot (z_1/z_{10}) \times \\ \times (1 - s_o \sin \beta_1 / (\pi m z_1) \pm s_o \cos \gamma_{mo} / (\pi m z_{10}))], \quad (7)$$

где $\gamma_{mo}, \lambda_{mo}$ - соответственно углы подъема винтовой линии стружечной канавки и витков фрезы.

В зависимости от параметров зубофрезерования огибающая поверхность может быть образована только цилиндрическим участком червячной фрезы, только коническим, только окружностью или их различным сочетанием. Соответственно, цилиндрический и конический участки фрезы могут пересекать огибающую поверхность, образованную любым из названных элементов фрезы. Отсюда решение задачи по определению границ зоны резания будет состоять из совместного решения различных уравнений, приведенных выше и описывающих указанные поверхности.

Так, линия ta определится из совместного решения уравнений цилиндра фрезы (уравнение (1) при $\alpha = 0$ и $l_k \rightarrow \infty$) и образованной им на предыдущем обороте огибающей поверхности (уравнения (1) и (2) при $N = N - 1$); линия ab - из уравнений конуса фрезы (уравнение (1) при $\alpha = 0$) и образованной цилиндром на предыдущем обороте огибающей поверхности (уравнения (1) и (2) при $N = N - 1$); линия bc - из уравнений конуса фрезы (уравнение (1) при $\alpha = 0$) и образованной окружностью сопряжения на предыдущем обороте огибающей поверхности (уравнения (1) и (3) при $N = N - 1$); линия ck - из уравнений конуса (уравнение (1) при $\alpha = 0$) и образованной им на предыдущем обороте огибающей поверхностью (уравнения (1) и (2) при $N = N - 1$); линия kk_o - из уравнений конуса (уравнение (1) при $\alpha = 0$) и наружного цилиндра нарезаемого колеса (4); линия kn - из совместного решения двух уравнений, полученных из уравнения (1) путем последовательной подстановки в него сначала $\alpha = 0$, а затем $\alpha = \alpha_2$; линия $mnti$ - из уравнений (1) и (3) при $\alpha = 0$; линия to - из совместного решения двух уравнений, полученных из уравнения (1) путем последовательной подстановки в него при $l_k \rightarrow \infty$ сначала $\alpha = 0$, а затем $\alpha = \alpha_2$.

Координаты точек t, a, b, c, k, k_o, n, m пересечения указанных линий зоны резания определяются при совместном решении соответствующих уравнений. Например, координаты точки a могут быть найдены при совместном решении уравнений линий ta и ab , координаты точки b - из уравнений линий ab и bc и т.д.

Рассмотренная зона резания является одной из наиболее сложных, когда огибающая поверхность образована цилиндром, конусом и окружностью, а коническая часть фрезы пересекает все эти участки огибающей поверхности. При других условиях могут быть иные варианты образования зон резания, когда огибающая поверхность образуется окружностью и цилиндром фрезы, только цилиндром или только окружностью, или только конусом. Все эти варианты рассмотрены в диссертации

Располагая уравнениями для определения границ зоны резания, можно вычислить размеры слоев, срезаемых зубьями червячной фрезы. Для этого проведем через зуб червячной фрезы, расположенный на расстоянии L_n от межосевого перпендикуляра (рис. 1), плоскость NN ($L_n = y \cos \varphi + [z + s_o(N + \alpha/2\pi) \sin \varphi]$), перпендикулярную оси фрезы, определим координаты точек пересечения этой плоскости с границами зоны резания на входе зуба в нее и на выходе и вычислим толщину a и длину l срезаемого слоя:

$$a = (x_1 - x_2) \cos \theta, \quad (8)$$

$$l = r_{ao} \{ \arcsin[(-y_b \sin \varphi + z_b \cos \varphi) / r_{ao}] - \arcsin[(-y_d \sin \varphi + z_d \cos \varphi) / r_{ao}] \}, \quad (9)$$

где y_b, z_b - координаты точки b_n на входе зуба в резание; y_d, z_d - координаты точки d_n на выходе зуба из зоны резания; $r_{ao} = k \left[y \cos \varphi + \left(z + s_o \frac{\alpha_o}{2\pi} \right) \sin \varphi - l_o \right]$ - радиус окружности в сечении конуса фрезы плоскостью, перпендикулярной оси фрезы; $\theta = \arcsin [(-y \sin \varphi + z \cos \varphi) / r_{ao}]$ - текущий угол контакта зуба фрезы с заготовкой; x_1 определяется из уравнения (1) при $\alpha = \alpha_z$ и известных координатах u и z точки зоны резания; x_2 - из этого же уравнения (1), но при $\alpha = 0$.

Для вычисления износа зубьев червячной фрезы использованы из литературных источников формулы, связывающие износ с размерами срезаемых слоев для нескольких обрабатываемых материалов:

для зубчатых колес из стали 18ХНМА

$$h_u = C_h a_{cp}^{0.9} f^{0.58} \lambda^{0.81} v^{2.48} r_{ao}^{-1}, \quad (10)$$

из стали 34ХН1М

$$h_u = C_h a_{cp}^{0.68} f^{0.45} \lambda^{-1.02} v^{3.3} r_{ao}^{-1} \quad \text{при } \lambda = 1 \div 1,5,$$

$$h_u = 0,533 C_h a_{cp}^{0.72} f^{0.51} \lambda^{0.86} v^{3.3} r_{ao}^{-1} \quad \text{при } \lambda = 1,5 \div 3; \quad (И)$$

из стали 38ХС

$$h_u = C_h a_{cp}^{1.05} f^{0.9} v^2 r_{ao}^{-1}, \quad (12)$$

где h_u - интенсивность износа, мм/мин; C_h - постоянный коэффициент; v - скорость резания, м/мин; a_{cp} - средняя толщина срезаемого слоя, мм; l - длина срезаемого слоя; $\lambda = l + a_{вых} / a_{cp}$ - коэффициент формы срезаемого слоя; $a_{вых} \# \llcorner$ - толщина среза на выходе зуба из зоны резания; r_{ao} - радиус фрезы на ее конической части (на цилиндрическом участке $r_{ao} = R_{ao}$), мм. При исследовании износа зубьев червячной фрезы необходимо еще располагать износом h_1 зуба за один рез (за один оборот фрезы), который можно определить по формуле

$$h_1 = h_u / n, \quad (13)$$

где n - частота вращения фрезы, об/мин.

При нарезании зубчатого колеса для каждого зуба фрезы можно выделить три периода - врезания, установившийся и выхода. Соответственно для определения суммарного износа A зуба необходимо сложить единичные износы h_1 за все периоды работы.

$$h = h'_{сп} n_{сп} + h'_{уст} n_{уст} + h'_{вых} n_{вых}, \quad (14)$$

где $h'_{сп}$, $h'_{уст}$, $h'_{вых}$ - соответственно средний износ за 1 рез в период врезания, установившийся и выхода; $n_{сп}$, $n_{уст}$, $n_{вых}$ - соответственно число резов в периоды врезания, установившийся и выхода. При осевом врезании

$n_{сп} = n_{вых} = \frac{|z_b - z_d|}{s_o} \cdot \left(1 \pm \frac{s_o \cdot \sin \beta_1}{\pi m z_1} \right) \cdot \frac{z_1}{z_{10}}$; в установившийся период
 $n_{узм} = \frac{B - |z|}{s_o} \cdot \left(1 \pm \frac{s_o \cdot \sin \beta_1}{\pi m z_1} \right) \cdot \frac{z_1}{z_{10}}$, где B - ширина заготовки, $z = z_{dn}$ при встречной осевой подаче, $z = z_{bn}$ при попутной осевой подаче (см. рис. 1). При радиальном врезании $n_{сп} = \frac{H}{s_p} \cdot \frac{z_1}{z_{10}}$, где H - глубина врезания.

Полученные формулы позволяют определить зону резания, размеры срезаемого слоя, износ червячных фрез с заборным конусом, длину загруженного участка, путь врезания в заготовку при любых сочетаниях параметров зубофрезерования, в том числе для червячных фрез с иным исполнением заборной части, например выполненной в виде выпуклого или вогнутого тора. Для этого необходимо дополнительно располагать уравнениями семейства поверхностей тора

$$\begin{aligned}
 F = & \sqrt{\left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right)^2 + \left\{ (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right\}^2} + \\
 & + c - \sqrt{R_1^2 - \left[(x \sin \alpha + y \cos \alpha) \cos \varphi - \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \sin \varphi - b \right]^2} = 0. \quad (15)
 \end{aligned}$$

Про дифференцировав уравнение (15) по параметру α получим:

$$\begin{aligned}
 F_\alpha = & \frac{\left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \left(-x \sin \alpha - y \cos \alpha + \frac{s_p}{2\pi} \right)}{\sqrt{\left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right)^2 + \left\{ (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right\}^2}} + \\
 & + \frac{\left\{ (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right\} \left[(x \cos \alpha - y \sin \alpha) \sin \varphi + \frac{s_o}{2\pi} \cos \varphi \right]}{\sqrt{\left(x \cos \alpha - y \sin \alpha + A_o + s_p \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right)^2 + \left\{ (x \sin \alpha + y \cos \alpha) \sin \varphi + \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \cos \varphi \right\}^2}} + \\
 & + \frac{\left[(x \sin \alpha + y \cos \alpha) \cos \varphi - \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \sin \varphi - b \right] \left[(x \cos \alpha - y \sin \alpha) \cos \varphi - \frac{s_o}{2\pi} \sin \varphi \right]}{\sqrt{R_1^2 - \left[(x \sin \alpha + y \cos \alpha) \cos \varphi - \left(z + s_o \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \right) \sin \varphi - b \right]^2}} = 0, \quad (16)
 \end{aligned}$$

где c, b - координаты центра окружности радиуса R_1 , образующей тор.

Система уравнений (15) и (16) описывает огибающую поверхность тороидально-го участка при относительном движении червячной фрезы и нарезаемого зубча-

того колеса. В уравнениях (15) и (16) учтены осевая и радиальная подачи. В случае включения тангенциальной подачи необходимо в этих уравнениях вместо Z записать $b \pm s_T \left(N + \frac{\alpha}{2\pi} \right)$. Приравнявая нулю ту или иную подачу, получим частные формулы для вариантов врезания с осевой, радиальной, тангенциальной подачами или их комбинацией. Границы зоны резания для фрезы с торовой заборной частью состоят из отдельных участков, образованных пересечением соответствующих поверхностей при относительном движении фрезы и нарезаемого колеса. В качестве примера на рис.1 приведена зона резания (штрихпунктирный контур) для фрезы с заборной частью в виде тора.

3. Исследование влияния угла и положения заборного конуса червячной фрезы на износ ее зубьев в зависимости от технологической схемы и параметров зубофрезерования. На основе изложенной методики исследования износа червячных фрез, разработанного математического и программного обеспечения выполнено исследование влияния на износ зубьев фрезы параметров заборного конуса (угла и положения относительно межосевого перпендикуляра) в 4-х технологических схемах зубофрезерования и 6-ти способах врезания фрезы в заготовку: осевом, радиальном, тангенциальном, радиально-осевом, радиально-тангенциальном, тангенциально-осевом (диагональном). Заборный конус в зависимости от условий зубофрезерования расположен на входной стороне фрезы или/и на выходе. При этом в резании могут участвовать коническая и цилиндрическая части фрезы или только заборный конус. Рассмотрены варианты обработки зубьев колеса с полным профилированием (чистовая обработка), частичным недопрофилированием одной стороны профиля зубьев или обеих сторон (черновая обработка). Исследован износ зубьев червячной фрезы с заборной частью тороидальной формы. Рассмотрено влияние обрабатываемого материала на износ зубьев фрезы и выбор параметров заборного конуса и технологической схемы зубофрезерования. Исследованы возможности применения осевых смещений фрезы и разных циклов обработки колеса. Параллельно для сравнения выполнены аналогичные исследования при нарезании зубчатых колес червячными фрезами без заборного конуса.

При проведении данного исследования в качестве критерия оптимальности при выборе варианта обработки зубчатого колеса и параметров заборного конуса фрезы в зависимости от решаемой задачи принимались износ h , интенсивность износа h_u , длина загруженного участка фрезы L_p , коэффициент расхода $k_p = h_{max} \cdot L_p$ или интенсивности расхода $k_{up} = h_u \cdot L_p$ материала инструмента (h_{max} h_u max - максимальные износ и интенсивность износа фрезы), машинное время.

Результаты этих исследований представлены в диссертации в виде графиков и таблиц. Диапазон изменения параметров зубчатого колеса - $z_1=60 \div 150$, $\beta_1=0 \div 20^\circ$, материал - стали 18ХНМА, 34ХН1М, 38ХС; червячной фрезы - $\psi=0 \div 15^\circ$; положения заборной части относительно МОП - $L_f = -20 \div 40$ мм. Последовательность поиска оптимального решения задачи в каждом конкретном случае нарезания зубчатого колеса червячной фрезой с заборным конусом про-

демонстрирована в автореферате на примере обработки колеса с осевой подачей, с радиальным врезанием для четырех технологических схем зубофрезерования (схема I - направление витков фрезы и зубьев колеса разноименное, подача встречная; схема II - фреза-колесо разноименные, подача попутная; схема III - фреза-колесо одноименные, подача попутная; IV - фреза-колесо одноименные, подача встречная). В схемах I и III заборный конус на входе, в схемах II и IV - на выходе.

Результаты исследования износа червячных фрез с заборным конусом для одного из вариантов обработки колеса из стали 18ХНМА представлены в виде графиков на рис.2, из которых видны изменения зоны резания (рис.2,(7,б), размеров срезаемых слоев (рис.2,в) и износа зубьев червячной фрезы (рис.2,г), длину загруженного участка фрезы L_p , путь врезания $l_{сп}$ в зависимости от угла заборного конуса и его положения L_p относительно МОП для технологических схем I-IV. Результаты обработки графиков износа на рис.2, а также аналогичных графиков, полученных для других положений заборного конуса, характеризуемых величиной L_p , и других обрабатываемых материалов (34ХН1М, 38ХС) сведены в табл.1. При анализе табличных данных и графиков износа для стали 18ХНМА видно, что угол заборного конуса и его положение влияют на длину загруженного участка фрезы L_p , износ h_{max} , коэффициент k_p , путь врезания $l_{сп}$. Из таблицы видно, что при полном профилировании зубьев нарезаемого колеса (опыты 1-13) лучшим для червячной фрезы с заборным конусом оказался опыт 8 (схема II, $L_I=20$ мм, $\psi=5^\circ$, $L_p=64$ мм, $h_{max}=0,14$ мм, $k_p=9$), который несколько уступает по коэффициенту k_p опыту 2 (схема II, $\psi=0$, $L_p=79$ мм, $h_{max}=0,102$ мм, $k_p=8,1$), но компенсируется это сокращением пути врезания $l_{сп}$ с 56 до 50,3 мм (в 1,1 раза) и величины L_p с 79 до 64 мм (в 1,23 раза). При некотором недопрофилировании одной из сторон зубьев колеса лучшим оказался опыт 15 (схема I, $L_I=0$, $\psi=10^\circ$, $L_p=59$ мм, $h_{max}=0,13$ мм, $k_p=7,7$). При некотором недопрофилировании обеих сторон колеса лучшим оказался опыт 24 (схема I, $L_I=20$ мм, $\psi=10^\circ$, $L_p=50$ мм, $h_{max}=0,11$ мм, $k_p=5,5$) и близкий к нему опыт 25 (схема II, $L_I=-20$ мм, $\psi=5^\circ$, $L_p=62$ мм, $h_{max}=0,09$ мм, $k_p=5,6$), они же оказались наилучшими во всей серии опытов табл.1. При сравнении между собой всех опытов табл.1 видно, что L_p изменяется от 93 до 40 мм (в 2,3 раза), h_{max} - от 0,102 до 0,73 мм (в 7,1 раза), k_p - от 5,5 до 32,8 (в 6,0 раз), машинное время, пропорциональное количеству оборотов колеса за период его нарезания N_{Σ} - в 1,23 раза (N_{Σ} изменяется от 38,7 до 31,4), при этом время врезания фрезы в заготовку - в 1,64 раза.

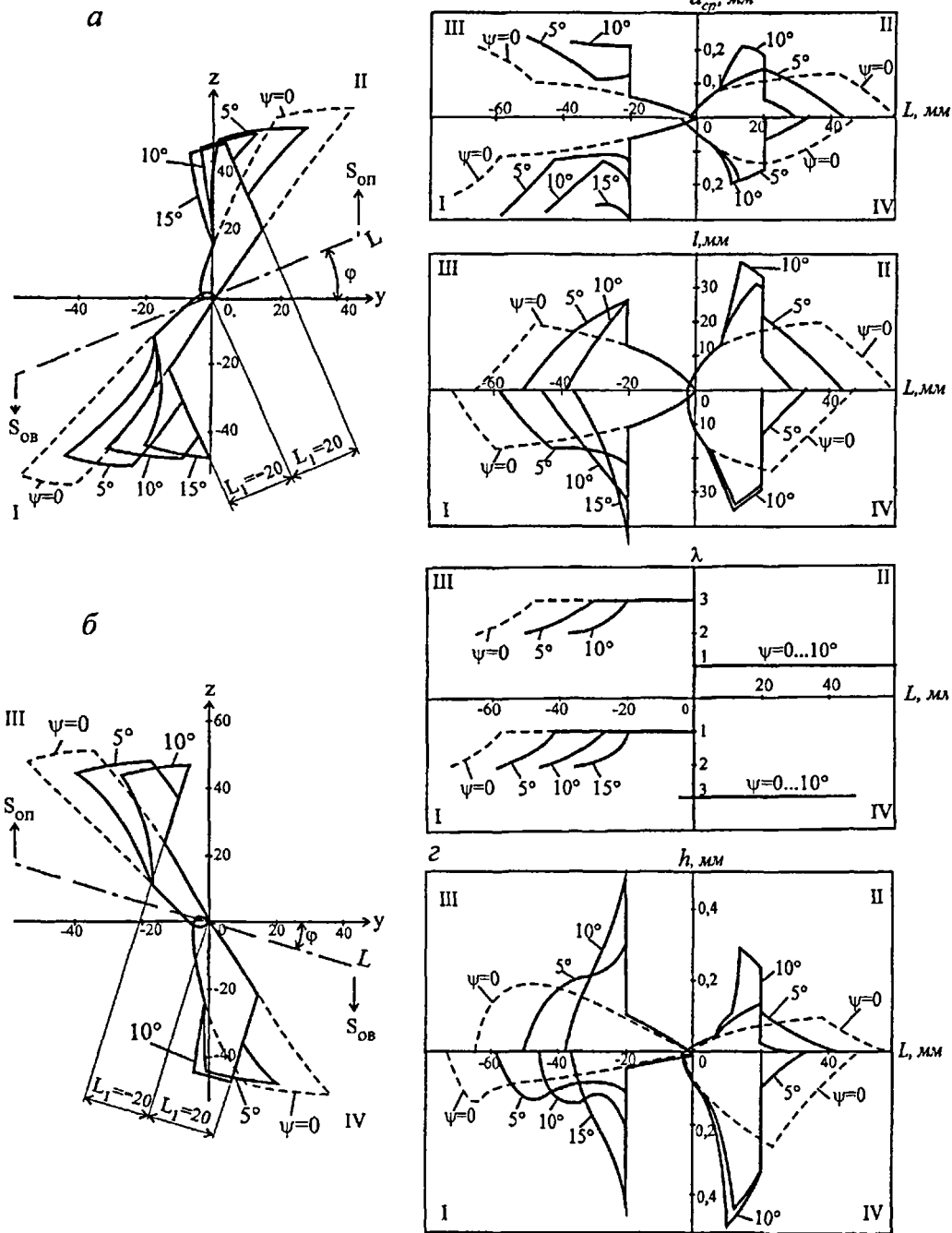


Рис.2. Влияние угла заборного конуса червячной фрезы: а, б - на зону резания; в - размеры срезаемых слоев; з - износ зубьев (схемы I и III, $L_1 = -20$ мм; схемы II и IV, $L_1 = 20$ мм).

Колесо из стали 18ХНМА $z_f = 60$, $\beta_f = 20^\circ$. Подача осевая $s_x = 3$ мм/об

Таблица 1

Расчетные значения L_p , h_{max} , k_p при обработке колес из разных материалов
 ($z_1=60$, $m=6$ мм, $\beta=20^\circ$, осевая подача $s_p=3$ мм/об)

№	Схе- ма	L_1 , мм	ψ°	L_p , мм	Обрабатываемый материал						l_{op} , мм	N_{op}	N_E
					18ХНМА		34ХН1М		38ХС				
					h_{max} мм/зуб	k_p	h_{max} мм/зуб	k_p	h_{max} мм/зуб	k_p			
1	I	-	0	93	0,13	12,1	0,21	19,5	0,15	14,0	56	18,7	38,7
2	II			79	0,102	8,1	0,23	18,2	0,18	14,2	56	18,7	38,7
3	III			86	0,195	16,8	0,24	20,6	0,15	12,9	50,8	16,9	36,9
4	IV			68	0,26	17,7	0,32	21,8	0,22	15,0	50,8	16,9	36,9
5	I	-20	5	79	0,13	10,3	0,25	19,8	0,19	15,0	50,3	16,8	36,8
6			10	66	0,22	14,5	0,41	27,0	0,45	29,7	47,7	15,9	35,9
7			15	56	0,43	24,1	0,46	25,8	-	-	47,4	15,8	35,8
8	II	20	5	64	0,14	9,0	0,29	18,5	0,27	17,3	50,3	16,8	36,8
9			10	50	0,29	14,5	0,51	25,5	0,63	31,5	47,7	15,9	35,9
10	III	-20	5	71	0,29	20,6	0,34	24,1	0,25	17,8	47,4	15,8	35,8
11			10	58	0,51	29,6	0,54	31,3	0,57	33,0	46,9	15,6	35,6
12	IV	20	5	54	0,45	24,3	0,50	27,0	0,46	24,8	47,4	15,8	35,8
13			10	40	0,49	19,6	0,53	21,2	0,50	20,0	46,9	15,6	35,6
14	I	0	5	74	0,125	9,25	0,19	14,1	0,14	10,4	46,7	15,5	35,5
15			10	59	0,13	7,7	0,28	16,5	0,24	14,2	41,2	13,7	33,7
16			15	46	0,12	10,1	-	-	-	-	38,8	12,9	32,9
17	II	0	5	61	0,16	9,8	0,22	13,4	0,28	17,1	46,7	15,5	35,5
18			10	44	0,26	11,4	0,50	22,0	0,68	29,9	41,2	13,7	33,7
19	III	0	5	68	0,19	12,9	0,23	15,6	0,16	10,9	44,1	14,7	34,7
20			10	52	0,29	15,1	0,35	18,2	0,28	14,6	41,0	13,7	33,7
21	IV	0	5	50	0,42	21,0	0,48	24,0	0,42	21,0	44,1	14,7	34,8
22			10	40	0,69	27,6	0,70	28,0	0,84	33,6	41,0	13,7	33,7
23	I	20	5	70	0,11	7,7	0,17	11,9	0,13	9,1	42,9	14,3	34,3
24			10	50	0,11	5,5	0,16	8,0	0,13	6,5	34,3	11,4	31,4
25	II	-20	5	62	0,09	5,6	0,21	13,0	0,16	9,9	42,9	14,3	34,3
26			10	44	0,32	14,1	0,32	14,1	0,43	18,9	34,3	11,4	31,4
27	III	20	5	63	0,18	11,3	0,22	13,9	0,14	8,8	40,7	13,6	33,6
28			10	45	0,20	9,0	0,23	10,4	0,17	7,6	34,4	11,5	31,5
29	IV	-20	5	50	0,23	11,5	0,28	14,0	0,20	10,0	40,7	13,6	33,6
30			10	45	0,73	32,8	0,74	33,3	0,58	26,1	34,4	11,5	31,5

Аналогичные исследования были проведены для случая радиального врезания червячной фрезы в заготовку и последующего резания с осевой подачей. Результаты представлены в табл.2. Опыты 1-8 получены при нарезании колеса червячной фрезой без заборного конуса с осевой подачей (опыты 1-4) и при радиальном врезании (опыты 5-8). При полном профилировании зубьев колеса фрезой с заборным конусом (опыты 9-12) лучшим по износу и коэффициенту k_p оказался опыт 10 (схема II, $L_1=20$ мм, $\psi=5^\circ$, $L_p=64$ мм, $h_{max}=0,11$ мм, $k_p=7$); при некотором недопрофилировании одной из сторон зубьев колеса лучшим оказал-

ся опыт 13 (схема I, $L_1=0$, $\psi=5^\circ$, $L_p=74$ мм, $h_{max}=0,088$ мм, $k_p=6,5$); при некотором недопрофилировании обеих сторон зубьев колеса лучшими оказались опыт 17 (схема I, $L_1=20$ мм, $\psi=5^\circ$, $L_p=70$ мм, $h_{max}=0,076$ мм, $k_p=5,3$) и близкий к нему опыт 18 (схема II, $L_1=-20$ мм, $\psi=5^\circ$, $L_p=62$ мм, $h_{max}=0,092$ мм, $k_p=5,7$), они же оказались наилучшими по h_{max} и k_p во всей серии опытов, включая и опыты с фрезой без заборного конуса.

Таблица 2

Расчетные значения L_p , h_{max} , k_p , l_{ep} , N_{ep} , N_Σ
(материал колеса – сталь 18ХНМА, $z_1=60$, $m=6$ мм, $\beta=20^\circ$)

№ опыта	Схема зубо-фрезерования	L_1 , мм	ψ°	s_o	s_p	L_p	h_{max}	k_p	l_{ep} , мм	N_{ep}	N_Σ
1	I	-	0	3	-	93	0,130	12,1	56	18,7	38,7
2	II					79	0,102	8,1			
3	III					86	0,195	16,8			
4	IV					68	0,260	17,7			
5	I	-	0	3	1,5	93	0,078	7,3	13,5	9	30
6	II					79	0,078	6,2			
7	III					86	0,208	17,9			
8	IV					68	0,208	14,1			
9	I	-20	5	3	1,5	79	0,160	12,6	13,5	9	30
10	II	20				64	0,110	7,0			
11	III	-20				71	0,376	26,7			
12	IV	20				54	0,320	17,3			
13	I	0	5	3	1,5	74	0,088	6,5	13,5	9	30
14	II	0				61	0,180	11,0			
15	III	0				68	0,226	15,4			
16	IV	0				50	0,414	20,7			
17	I	20	5	3	1,5	70	0,076	5,3	13,5	9	30
18	II	-20				62	0,092	5,7			
19	III	20				63	0,186	11,7			
20	IV	-20				50	0,196	9,8			

При сравнении между собой всех опытов табл.2 видно, что L_p изменяется от 93 до 50 мм (в 1,86 раза), h_{max} - от 0,076 до 0,414 мм (в 5,4 раза), k_p - от 5,3 до 26,7 (в 5,0 раз), машинное время, пропорциональное N_{Σ} , - в 1,29 раза (N_Σ изменяется от 38,7 до 30,0), при этом время врезания фрезы в заготовку - примерно в 2 раза. Причина такого изменения h_{max} и k_p в опытах табл.1 и 2 заключается в изменении размеров срезаемых слоев - длин, толщин и особенно формы среза, характеризующей коэффициентом λ , который для схем I и II находится в пределах $1 \div 2$, для схем III и IV - в пределах $2 \div 3$, т.е. для схем III и IV врезание зубьев в заготовку неблагоприятно (при $\lambda=3$ врезание происходит с нулевой толщины, отсюда проскальзывание и интенсивный износ).

Таким образом, видно, что диапазон изменения L_p , h_{max} , k_p , l_{ep} , N_{ep} , N_Σ в зависимости от исходных параметров заборного конуса весьма значителен, что говорит о необходимости правильного выбора последних.

Аналогичные опыты проведены для других способов врезания в заготовку червячной фрезы с заборным конусом (схема I, $\psi=5$ и 10° , $L_1=0$ и -20 мм), которые дали следующие результаты: при тангенциальном врезании $k_p=11,6$, радиально-осевом - 8,2, тангенциально-радиальном - 7,8, тангенциально-осевом (диагональном) - 10,8, т.е. в данном случае результаты по коэффициенту k_p несколько отстают от лучших предыдущих вариантов обработки зубчатых колес при радиальном и осевом врезании.

При исследовании влияния параметров нарезаемого колеса (материал, z_1 , β_1) на износ и коэффициент k_p были получены следующие результаты. При обработке колес из разных материалов оказалось, что между графиками износа зубьев фрезы существует качественное сходство. При одинаковых параметрах зубофрезерования графики износа для разных материалов по характеру (например, по форме кривых и положению максимально изношенных зубьев) достаточно близки между собой. Отличаются они тем, что соотношение максимальных износов h_{max} (см. табл.1) в разных технологических схемах при переходе от обработки одного материала к обработке другого различно, и это различие иногда существенно (например, в опытах 1-4 при сравнении материалов 18ХНМА и 34ХН1М), а иногда незначительно (например, в тех же опытах 1-4 при сравнении материалов 34ХН1М и 38ХС). Объясняется это различной степенью влияния толщины, длины и формы срезаемых слоев на износ зубьев фрезы при обработке разных материалов.

Сравнение обрабатываемых материалов по коэффициенту k_p тоже неоднозначно, как и при сравнении по износу h_{max} . Примером могут служить те же опыты 1-4, в которых есть различие в соотношениях коэффициентов k_p в разных технологических схемах при переходе от стали 18ХНМА к стали 34ХН1М, и это различие мало при сравнении сталей 34ХН1М и 38ХС. Это же наблюдается и при рассмотрении других серий опытов.

В случае обработки колес из сталей 18ХНМА и 34ХН1М с радиальным врезанием и последующим профилированием зубьев колеса с осевой подачей оптимальные параметры конуса и технологическую схему, найденные для одного материала, можно рекомендовать и для другого, хотя соотношение h_{max} и k_p в технологических схемах для разных обрабатываемых материалов различно. То, что при радиальном врезании по сравнению с осевым оптимальное решение задачи оказалось однозначным, связано с иным перераспределением нагрузки между зубьями червячной фрезы.

При исследовании (аналогичном табл.1) влияния числа зубьев колеса на выбор оптимальных параметров заборного конуса и технологической схемы зубофрезерования оказалось, что с изменением z_1 от 60 до 100 наилучшие варианты в каждой серии опытов обработки колеса (полное профилирование, частичное недопрофилирование одной или обеих сторон зубьев колеса) за редким исключением достаточно близки, хотя z_1 вносит некоторые изменения в количественные соотношения как h_{max} , так и k_p в разных сериях опытов.

Исследование нарезания прямозубого колеса ($z_1=150$, $m=6$, сталь 18ХНМА червячной фрезой с заборным конусом $\psi=5^\circ$ на входе в схеме I ($L_1=-20, 0, 20$

лш) и на выходе или входе в схеме ($\Psi_1=0$) показало, что наилучшие варианты обработки оказались в схеме I ($L_f=20$ мм) и схеме П (конус на выходе), остальные варианты существенно им проигрывают по коэффициенту k_p (в $1,5 \div 2,5$ раза).

Таким образом, оказалось, что параметры нарезаемого колеса влияют на выбор оптимальной технологической схемы, угла и положения заборного конуса червячной фрезы.

Было проведено сравнительное исследование червячных фрез с заборной частью в виде тора (выпуклого или вогнутого) и фрез с заборным конусом. Для фрез с выпуклым тором принимались $L_f=0$ и -20 мм, а у г оц у торца фрезы был равен 5, 10 и 15° , при этом радиус окружности тора выбирался таким, чтобы длина загруженного участка была такая же, как и у фрез с конической заборной частью при аналогичных значениях ψ . При сравнении фрез с тором и заборным конусом отметим, что на степень их различия в износе влияет угол ψ , обрабатываемый материал и величина L_f . При $L_f = -20$ мм и обработке стали 18ХНМА износ фрезы с тором и конусом отличаются в ту или иную сторону на $10 \div 23\%$; при обработке стали 34ХН1М - несколько предпочтительнее фреза с тором; при обработке стали 38ХС у фрезы с тором есть преимущество в 1,5 раза при $\psi \geq 10^\circ$. При $L_f=0$ и обработке стали 18ХНМА преимущество по износу за фрезой с конусом; при обработке стали 34ХН1М и $\psi=5$ и 10° они практически равны, при $\psi=15^\circ$ несколько предпочтительнее фреза с тором; при обработке стали 38ХС износ фрезы с тором и конусом отличаются в ту или иную сторону на $20 \div 30\%$. Все эти выводы относятся и к сравнению вариантов обработки колеса по коэффициенту расхода материала инструмента k_p .

Для вогнутого профиля заборной части фрезы также не получено однозначного решения и оптимальный вариант надо искать в каждом конкретном случае.

Сравнительные исследования влияния инструментального материала на некоторые эксплуатационные характеристики процесса зубофрезерования (износ, осевые смещения фрезы) показали, что при переходе от быстрорежущей стали к твердому сплаву из-за разной степени влияния параметров зубофрезерования на указанные характеристики не удастся учесть изменившиеся условия резания введением постоянного поправочного коэффициента.

На основе результатов проведенного в разделе 3 исследования влияния заборного конуса на износ червячной фрезы в разных условиях ее эксплуатации можно сделать следующие выводы:

- исполнение и использование червячной фрезы с заборным конусом многовариантно;
- оптимальный вариант решения задачи по эксплуатации червячной фрезы с заборным конусом может быть найден только путем исследования нескольких вариантов исполнения и использования заборного конуса на входной или выходной части фрезы в зависимости от технологической схемы зубофрезерования, способа врезания фрезы в заготовку, параметров нарезаемого колеса, габаритных размеров фрезы, допускающих тот или иной вариант обработки колеса;

- оптимальный вариант решения задачи связан с выбранным критерием оценки работоспособности червячной фрезы (h , k_p) и различного рода ограничениями, например, длиной фрезы;
- из количественных результатов исследования видно, что в зависимости от условий зубофрезерования значения критериев оценки работоспособности червячной фрезы с заборным конусом изменяются в широких пределах, поэтому произвольное ее применение недопустимо, так как приведет к значительным потерям по расходу инструмента и производительности процесса зубофрезерования;
- разработанное методическое и программное обеспечение позволяет решить задачу оптимизации использования фрезы при любом исполнении ее заборной части (не только в виде конуса или тора);
- применение заборного конуса позволяет перераспределить нагрузку между зубьями фрезы, сократить путь ее врезания в заготовку при осевом врезании, уменьшить длину загруженного участка, что позволяет использовать более короткую фрезу;
- из-за разной загрузки зубья фрезы изношены неравномерно, наблюдаются резкие всплески износа в области сопряжения конической и цилиндрической частей инструмента, что объясняется характеристиками зоны резания и, как следствие, размерами срезаемых слоев; неравномерность износа зубьев фрезы желательно сгладить с целью более полного использования ее режущих способностей (варианты решения этой задачи рассмотрены в разделе 4);
- при переходе от фрезы из быстрорежущей стали к твердосплавной не удастся учесть изменившиеся условия резания в широком диапазоне изменения параметров зубофрезерования путем введения постоянного поправочного коэффициента для таких эксплуатационных характеристик, как износ и осевые перестановки фрезы.

4. Управление распределением износа по зубьям червячной фрезы с заборным конусом. Анализ графиков износа зубьев червячной фрезы с заборным конусом в разных технологических схемах зубофрезерования и при разных способах врезания показал, что как и в случае использования фрезы без заборного конуса режущая способность некоторых зубьев инструмента недоиспользована. Поэтому представляет интерес рассмотрение возможностей дозагрузки этих зубьев за счет периодических осевых смещений, чередования схем зубофрезерования или сочетания этих вариантов управления износом фрезы. Если для червячных фрез без заборного конуса есть справочные данные по периодическим осевым перестановкам в зависимости от параметров зубофрезерования и некоторые сведения о чередовании схем зубофрезерования (циклах обработки), то для червячных фрез с заборным конусом подобная информация отсутствует. Предложенный выше метод исследования позволяет восполнить этот пробел. Решение этой задачи рассмотрено с нескольких позиций в зависимости от исходных данных: при ограниченной длине фрезы и невозможности применения осевых смещений необходимо выбрать оптимальную технологическую схему, способ врезания, ψ и L_f (эта задача решена в разделе 3); при заданной длине

червячной фрезы определить оптимальную технологическую схему, способ врезания, ψ , начальное значение L_I и возможность применения осевых смещений; при заданной длине червячной фрезы определить ψ , L_I и оптимальные способ врезания и технологические схемы, которые (схемы) можно чередовать в процессе нарезания зубчатых колес; при заданной длине червячной фрезы определить ψ , L_I и технологические схемы, которые можно сочетать с осевыми смещениями. На основе полученных в разделе 3 графиков износа зубьев фрезы было решено 4 варианта задачи оптимизации параметров зубофрезерования для фрезы с заборным конусом: без осевых смещений фрезы и циклов обработки колеса; с осевыми смещениями фрезы, но без циклов обработки; с циклами обработки, но без осевых смещений фрезы; с осевыми смещениями и циклами обработки. В качестве основного критерия оценки оптимальности варианта обработки зубчатого колеса выбран коэффициент расхода инструмента k_p . В том случае, когда по коэффициенту k_p было проблематично сделать выбор в пользу того или иного варианта обработки колеса, использовались дополнительные характеристики - длина фрезы, путь врезания фрезы в заготовку, машинное время. Исследования были разделены на 4 блока, отличающихся между собой числом нарезаемых зубьев и материалами колес. Результаты исследования для одного из блоков приведены в табл.3 (некоторые графики износа для нее изображены на рис.2,г), в которой указаны условия проведения опытов и их результаты: исходные данные (модуль, число, угол наклона зубьев и материал нарезаемого колеса, подача, схема зубофрезерования, угол конуса); принятые значения осевых смещений фрезы l_n , положения основания конуса относительно МОП L_i , последовательность нарезания колес и их нарезаемое количество q в каждой позиции инструмента, суммарное число нарезаемых колес Q ; полученные расчетные значения длины фрезы, участвующей в резании L_p , износа фрезы h_{max} и коэффициента расхода инструмента на одну заготовку k_p . Опыты разбиты на серии: зубчатые колеса обрабатываются без осевых смещений фрезы, только с осевыми смещениями, только с изменением циклов обработки и, наконец, с циклами и осевыми смещениями.

Из таблицы видно, что способ использования червячной фрезы существенно влияет на величину k_p , который изменяется от 12,1 до 5,4 (в 2,2 раза). Лучшими оказались варианты обработки колеса в опытах 16 (чередуются схемы I—II, $\psi=5^\circ$ на входе и выходе, $l_n=20$ мм, $k_p=5,4$) и 17 (схема I, $\psi=10^\circ$, $L_i=20$ мм, $k_p=5,4$). Если ограничением является длина фрезы, то для чистового зубофрезерования лучшим окажется опыт 15 (схема I, $\psi=10^\circ$; схема II, $\psi=5^\circ$; $l_n=20$ мм, $k_p=7,7$, $L_p=70$ мм), а для чернового - опыт 17 ($L_p=54$ мм).

Таблица 3

Влияние способов использования фрезы на параметры L_p , h_{\max} и k_p
 ($m=6$ мм, $z_1=60$, $\beta_1=20^\circ$, $s_o=3$ мм/об, сталь 18ХНМА)

Способ использования фрезы	№ опыта	Схема зубофрезерования	ψ°	l_n мм	L_1 , мм				Q, шт	L_p мм	h_{\max} мм	k_p
					-20	0	20	40				
					Количество нарезанных колес q							
без осевых смещений	1	I	0						1	93	0,13	12,1
	2	II	0						1	79	0,102	8,1
только с осевыми смещениями	3	I	5	20	1	1			2	95	0,20	9,5
	4	I	5	20	1	2			3	95	0,26	8,2
	5	I	10	20	1	1	1		3	95	0,38	12,0
	6	I	10	20	1	1	4		6	95	0,50	7,9
только циклы	7	I	5		1				2	102	0,13	6,6
		II	5			1						
	8	I	0						1	133	0,13	8,6
		II	0									
	9	I	10		1				2	90	0,21	9,4
		II	5			1						
	10	I	5		1				2	96	0,13	6,2
		II	5		1							
	11	I	10		1				2	82	0,21	8,6
		II	5		1							
12	I	5				1		2	76	0,21	8,0	
	II	5				1						
циклы и осевые смещения	13	I	5	20	1				1	98	0,13	6,3
		II	0									
	14	I	0	40					1	93	0,13	6,1
		II	0									
	15	I	10	20	1				2	70	0,22	7,7
		II	5				1					
16	I	5	20	1				2	83	0,13	5,4	
	II	5				1						
без осевых смещений	17	I	10				1		1	54	0,10	5,4

Результаты проведенного исследования по управлению распределением износа по зубьям червячной фрезы с заборным конусом (и без него) и оптимизации конструктивных и технологических параметров зубофрезерования (схемы зубофрезерования, способа врезания, угла заборного конуса ψ , величины L_1 способа использования фрезы - с осевыми смещениями, без них, с изменением только цикла обработки, или сочетанием цикла с осевыми смещениями) с целью более полного использования режущих способностей фрезы показали, что решение задачи многовариантно. При этом наилучшим вариантом обработки колеса может оказаться как вариант применения червячной фрезы с заборным конусом,

так и без него. Все зависит от конкретных условий нарезания зубчатого колеса, связанных с конструктивными параметрами червячной фрезы и техническими возможностями зубофрезерного станка, позволяющими осуществить тот или иной способ использования инструмента. Предложенные в работе методика исследования процесса зубофрезерования, математическое и программное обеспечение позволяют решить эту многовариантную задачу.

5. Экспериментальные исследования. С целью проверки объективности разработанного методического, математического и программного обеспечения и полученных на их основе результатов исследования износа червячных модульных фрез с заборным конусом были проведены экспериментальные исследования путем нарезания зубчатых колес на зубофрезерных станках в лабораторных и заводских условиях. При этом варьировались угол и положение заборного конуса, схемы зубофрезерования, способы врезания, циклы обработки зубчатых колес и периодические осевые смещения фрез. Сравнение результатов экспериментальных исследований износа червячных фрез и расчетных графиков износа в указанной серии опытов показало, что при наложении расчетных и фактических графиков износа и совмещении их максимальных значений среднеквадратические отклонения графиков не превышали $0,06 \pm 0,01$ что при допусковом износе фрезы $0,6 \pm 1$ мм вполне приемлемо для практических целей. Все это позволяет рекомендовать полученные результаты исследования для практического использования.

6. Результаты работы и основные выводы. При проведении данного исследования достигнута поставленная в работе цель: исследовано влияние заборного конуса червячной модульной фрезы на ее износ в разных технологических схемах зубофрезерования и оптимизированы параметры его исполнения и применения, обеспечивающие эффективное использование режущих способностей и технологических возможностей фрезы. Для этого были решены следующие задачи:

1. Разработано методическое, математическое и программное обеспечение для определения зоны резания, размеров срезаемых слоев и износа зубьев червячных фрез с заборным конусом на входной или/и выходной ее стороне;

2. Выбраны критерии оценки оптимального варианта обработки зубчатого колеса и параметров заборного конуса фрезы; в зависимости от условий зубофрезерования (технологическая схема, параметры колеса и фрезы, технологические возможности станка) этими критериями являются износ, интенсивность износа, длина загруженного участка фрезы, коэффициент расхода материала инструмента, машинное время; оптимальный вариант решения задачи связан с выбранным критерием оценки работоспособности червячной фрезы и разного рода ограничениями по инструменту или станку; в зависимости от условий зубофрезерования величины критериальных оценок работоспособности червячной фрезы с заборным конусом изменяются в широких пределах, поэтому ее произ-

вольное применение недопустимо, так как может привести к значительным потерям по расходу инструмента и производительности зубообработки;

3. Рекомендована последовательность поиска наиболее оптимального варианта исполнения и использования заборного конуса фрезы в зависимости от исходных условий нарезания колеса;

4. Исследованы и оптимизированы параметры заборного конуса червячной фрезы в зависимости от технологической схемы зубофрезерования при осевой подаче;

5. Выполнены сравнительные исследования износа червячной фрезы с заборным конусом при нарезании зубчатых колес при осевом и радиальном врезании фрезы в заготовку; при выборе оптимального варианта врезания в этом случае в качестве критерия принимался не только коэффициент k_p , но и время врезания фрезы в заготовку, которое при выбранном соотношении подач $s_o/s_p=2$ при радиальном врезании оказалось практически в 2 раза меньше, чем при осевом;

6. Исследовано влияние на износ червячной фрезы с заборным конусом способа врезания ее в заготовку (осевое, радиальное, тангенциальное, радиально-осевое, радиально-тангенциальное, диагональное);

7. Исследовано влияние параметров нарезаемого зубчатого колеса (число и угол наклона зубьев, материал) на выбор угла и положения заборного конуса фрезы;

8. Наблюдающиеся нередко всплески износа зубьев фрезы в области сопряжения ее конического и цилиндрического участков можно несколько сгладить путем выполнения заборной части фрезы в виде тора (выпуклого или вогнутого); разработанное методическое и программное обеспечение позволяет решить задачу оптимизации использования фрезы при любом исполнении ее заборной части (не только в виде конуса или тора);

9. Исследовано влияние угла и положения заборного конуса фрезы относительно МОП на ее износ для случая полного профилирования зубьев колеса при чистовом нарезании и частичном их недопрофилировании при черновой зубообработке;

10. Оптимальный выбор и применение заборного конуса позволяет более рационально распределить нагрузку между зубьями фрезы, сократить путь ее врезания в заготовку при осевой подаче, уменьшить длину загруженного участка фрезы и использовать более короткую фрезу, при этом не только не проиграть в износе, но и выиграть;

11. При переходе от фрезы из быстрорежущей стали к твердосплавной не удается учесть изменившиеся условия резания в широком диапазоне изменения параметров зубофрезерования путем введения постоянного поправочного коэффициента для таких эксплуатационных характеристик, как износ и осевые перестановки фрезы.

12. Решение задачи по управлению распределением износа по зубьям червячной фрезы с заборным конусом (и без него) и оптимизации конструктивных и технологических параметров зубофрезерования (технологическая схема, вари-

ант врезания, угол и положение заборного конуса, способ использования фрезы - с осевыми смещениями фрезы и без них, с изменением только циклов обработки колес или сочетанием циклов с осевыми смещениями) оказалось многовариантно; при этом наилучшим может оказаться вариант обработки зубчатого колеса как фрезой с заборным конусом, так и без него - все зависит от конкретных условий нарезания зубчатого колеса, связанных с конструктивными параметрами червячной фрезы и техническими возможностями зубофрезерного станка, позволяющими осуществить тот или иной способ использования инструмента; предложенная методика исследования процесса зубофрезерования позволяет решить эту многовариантную задачу;

13. Для каждого из исследованных конкретных вариантов использования червячных фрез с заборным конусом при нарезании зубчатых колес даны рекомендации по назначению оптимальных параметров заборного конуса фрезы и ее эксплуатации;

14. Результаты экспериментального исследования износа червячных фрез с заборным конусом и без него в заводских и лабораторных условиях их эксплуатации подтвердили теоретическую обоснованность предложенного методического, математического и программного обеспечения для исследования процесса зубофрезерования в широком диапазоне изменения параметров нарезаемых зубчатых колес, конструктивных элементов червячной фрезы с заборным конусом и без него, технологических схем зубофрезерования, способов более полного использования режущих способностей червячной фрезы в зависимости от условий зубофрезерования, ограниченных параметрами станка и/или инструмента;

15. Результаты проведенного исследования внедрены в производство и учебный процесс.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Ничков А.В., Соколов Д.Л. Методика и результаты исследования работоспособности твердосплавных червячных модульных фрез //Труды П Межвузовской отраслевой НТК «Автоматизация и прогрессивные технологии». Ч.2 Новоуральск, 1999. с. 48-51.
2. Ничков А.Г., Иванов С.А., Ничков А.В. Сравнительное исследование осевого и радиального способов врезания червячной модульной фрезы в заготовку //Труды П Межвузовской отраслевой НТК «Автоматизация и прогрессивные технологии». 4.2 Новоуральск, 1999. с. 43-45.
3. Ничкова С.А., Ничков А.В. Интенсификация процесса диагонального зубофрезерования //Вестник УГТУ-УПИ №3(11)-2000. Екатеринбург, 2000. с.29-30.
4. Ничков А.В. Сравнительное исследование частных и обобщенных зависимостей интенсивности износа и наибольшей толщины среза от параметров зубофрезерования //Вестник ПГТУ «Аэрокосмическая техника» 9/2001. Пермь, 2001. с. 66-71.
5. Ничков А.В., Жуков Ю.Н. Экспериментальная проверка результатов оптимизации параметров заборного конуса червячной фрезы //Научные труды III отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ /Сб.статей, Екатеринбург, 2002. с. 52-53.

6. Ничков А.В. Характерные зоны резания при нарезании зубчатых колес червячными фрезами с заборным конусом //Труды III Межотраслевой НТК «Автоматизация и прогрессивные технологии». Новоуральск, 2002. с. 354-358.
7. Ничкова С.А., Ничков А.В. Исследование периодических осевых перестановок червячных фрез в разных схемах и циклах обработки зубчатых колес //Труды Ш Межотраслевой НТК «Автоматизация и прогрессивные технологии». Новоуральск, 2002. с. 359-362.
8. Ничков А.В. К вопросу об оптимизации параметров заборного конуса червячной модульной фрезы //Всероссийская НТК «Аэрокосмическая техника и высокие технологии - 2002». ПГТУ, РАЕН. Пермь, 2002. с. 196.
9. Ничков А.В. Применение червячных фрез с заборным конусом в технологических схемах зубофрезерования //Технология производства машин /Межвузовский сборник научных трудов, вып.1., УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2003. С.16-23.
10. Ничкова С.А, Ничков А.В. Управление износом червячных фрез при диагональном зубофрезеровании //Технология производства машин /Межвузовский сборник научных трудов, вып.1., УГТУ-УПИ, Екатеринбург, 2003. С.36-39.
11. Ничков А.В., Жуков Ю.Н. Червячная фреза с заборной частью тороидальной формы //Научные труды IV отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ /Сб.статей, Екатеринбург, 2003. с. 426-428.
12. Ничков А.В. Износ червячной фрезы в разных вариантах ее исполнения и использования //Актуальные проблемы конструкторско-технологического обеспечения машиностроительного производства. /Материалы Международной НТК. Волгоградский ГТУ. Волгоград, 2003. С.84-86.
13. Ничков А.В., Жуков Ю.Н. Износ червячных фрез с заборным конусом при радиальном и осевом врезаниях //Научные труды V отчетной конференции молодых ученых ГОУ ВПО УГТУ-УПИ /Сб.статей, Екатеринбург, 2004. С.46-48.

Подписано в печать 28.04.04
Плоская печать

Формат 60x84 1/16
Тираж 100

Бумага писчая
Заказ 78

Ризография НИЧ ГОУ ВПО УГТУ-УПИ
620002 г. Екатеринбург, ул. Мира 19

- 8463