

ФГБОУ ВО «ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

на правах рукописи



ЯНОВ ЕВГЕНИЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ СБОРНЫХ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ  
ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ КОЛЕС**

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

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
докт. техн. наук, доцент Феофилов Н. Д.

Тула 2017

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ .....	6
I СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ .....	13
1.1 Общие сведения о червячных фрезах и процессах зубофрезерования..	13
1.2 Сила резания при зубофрезеровании.....	15
1.3 Степень разработанности темы исследования.....	19
1.4 Методы измерения силы резания.....	26
Выводы по I разделу.....	27
II КИНЕМАТИКА ЧЕРВЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ.....	28
2.1 Кинематика резания.....	28
2.2. Влияние взаимодействия зубьев червячной фрезы на суммарную си- лу резания.....	30
2.3 Кинематические задние углы экспериментальной фрезы .....	37
Выводы по II разделу.....	47
III ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗУ- БОФРЕЗЕРОВАНИЯ СБОРНЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ.....	48
3.1 Планирование эксперимента .....	48
3.2 Конструкция сборной червячной фрезы для проведения эксперимен- тов.....	50
3.3 Контроль геометрических размеров элементов сборной червячной фрезы.....	56
3.4 Исследовательский комплекс .....	60
3.5 Основные и вспомогательные средства для измерения и регистрации составляющих силы резания.....	64
3.6 Тарирование исследовательского комплекса.....	70
3.7 Выбор образцов для проведения силовых исследований.....	72

Выводы по III разделу.....	74
IV СИЛОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ.....	75
4.1 Экспериментальное исследование процесса зубофрезерования чер- вячными фрезами.....	75
4.2 Обработка экспериментальных данных.....	92
4.3 Моделирование износа сборной червячной фрезы.....	97
4.4 Точность нарезанных образцов.....	102
4.5 Деформация поверхностных слоев зубьев, нарезанных образцов.....	107
4.6 Микрогеометрия нарезанных образцов.....	111
Выводы по IV разделу.....	116
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.....	117
Библиографический список.....	119
Приложение.....	126

## ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

- $a$  - делительное межосевое расстояние цилиндрической зубчатой передачи, мм;
- $a_w$  - межосевое расстояние зубчатой передачи, мм;
- $a_{w0}$  - межосевое расстояние в станочном зацеплении зубчатой детали с инструментом, мм;
- $b$  - ширина зубчатого венца зубчатой детали, мм;
- $d, d_b$  - диаметры делительной и основной окружностей детали, мм;
- $d_a, d_f$  - диаметры окружностей вершин и впадин зубьев детали, мм;
- $d_w$  - начальный диаметр, мм;
- $i, u$  - передаточное отношение и передаточное число зубчатой передачи;
- $inv\alpha$  - эвольвентный угол профиля;
- $m_n, m_t, m_x$  - модуль нормальный, торцовый, осевой, мм;
- $p_n, p_t, p_x$  - шаг зубьев нормальный, торцовый и осевой, мм;
- $r$  - радиус зубчатой детали, мм;
- $p_z$  - ход зуба, мм;
- $p_\pi$  - винтовой параметр;
- $s_n, s_t, s_x$  - толщина зуба нормальная, торцовая и осевая, мм;
- $v$  - окружная скорость зубчатой детали, м/с;
- $W$  - длина общей нормали зубчатого колеса, мм;
- $z_1$  - число зубьев зубчатой детали;
- $\alpha$  - угол профиля зуба и зуба рейки, град;
- $\alpha_w$  - угол зацепления, град;
- $\beta$  - угол наклона линии зуба колеса или зуба рейки, град;
- $\eta$  - половина угловой ширины впадины зубчатого колеса, град;
- $\rho, \rho_f, \rho_k$  - радиус кривизны профиля зуба, переходной кривой зуба и линии притупления продольной кромки зуба;
- $\nu$  - угол развернутости эвольвенты зуба, град;

$\tau$  - угловой шаг зубьев, *град*;  
 $\varphi$  - фаза зацепления, *град*;  
 $\gamma_{m0}$  - угол подъема винтовой линии на среднем цилиндре  
 $\gamma_{b0}$  - угол подъема винтовой линии на основном цилиндре эвольвентной винтовой поверхности  
0, 1, 2 - зуборезный инструмент; шестерня; колесо;  
 $n, t, x$  - нормальный; торцовый; осевой;  
 $R, L$  - правого направления; левого направления;  
 $y$  - произвольная или характерная точка профиля;  
 $b, a, f$  - поверхность основная; вершин зубьев; ножек зубьев;  
 $l_v, l_n$  - путь врезания и перебега фрезы, *мм*;  
 $V$  - скорость резания, *мм/мин*;  
 $S_0$  - осевая подача фрезы на оборот зубчатого колеса, *мм/об*;  
 $T$  - период стойкости фрезы до передвижки, *мин*;  
 $P_x, P_y, P_z$  - составляющие силы резания, *Н*;  
 $\gamma_a$  - передний угол, *град*;  
 $n$  - частота вращения инструментального шпинделя, *об/мин*;

## ВВЕДЕНИЕ

Производство крупногабаритных зубчатых колес из закаленных (40-45 HRCэ) труднообрабатываемых сталей для подъемно-транспортных машин и изделий оборонно-промышленного комплекса связано с рядом особенностей, например, после зубообработки колеса разрезаются на сектора или подвергаются искусственному старению. Зубонарезание зубчатых венцов таких колес составляет до 60% машинного времени механической обработки, из-за больших объемов срезаемого металла и невысоких режимов резания. Для модулей до 10 мм зубофрезерование червячными фрезами является основным способом черновой и чистовой зубообработки. Точность зубчатого венца в наибольшей степени определяется эксплуатационными свойствами инструмента, степенью его износа, режимом резания. [11, 16, 27]. Стойкости отечественных червячных фрез, изготовленных по ГОСТ 9324 - 80 не всегда достаточно для нарезания даже одного зубчатого колеса, и перед чистовым проходом требуется перетачивание инструмента. Вариантами решения задачи, являются:

а) применение зарубежных быстрорежущих и твердосплавных удлиненных червячных фрез с измененной геометрией режущей части и обеспечивающих необходимое число переточек и передвижек;

б) диагональное фрезерование на станках с ЧПУ;

в) применение отечественных сборных червячных фрез на зубофрезерных станках с ЧПУ или с электромеханическим управлением на рациональных режимах резания.

Таким образом, теоретическое и экспериментальное обоснование рациональных геометрических параметров сборных червячных фрез и режимов резания, обеспечивающих требуемую стойкость червячной фрезы для нарезания крупногабаритных зубчатых венцов на заготовках из закаленной труднообрабатываемой стали, является *актуальной* научно-технической задачей.

Под стойкостью понимается время резания новым или преточенным инструментом с начала резания до отказа по ГОСТ 25751-83.

В лабораториях предприятий и учебных заведений Москвы, Курска, Тулы, Брянска, Волгограда, Орла, Липецка, Рыбинска, Краматорска, Екатеринбурга и других в различные годы проведены исследования процесса зубофрезерования червячными фрезами, однако, при этом не проводились силовые испытания сборных конструкций с поворотными зубчатыми рейками.

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 05.02.07 «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки».

**Цель работы** - заключается в повышении стойкости сборных червячных фрез при зубофрезеровании крупногабаритных колес путем определения конструктивных параметров инструмента и режима зубофрезерования с учетом требований к изделию и технических характеристик станка для обеспечения одного рабочего хода или нескольких полных рабочих ходов.

Для достижения указанной цели потребовалось решить задачи:

- 1) проведение анализа состояния зубообработки закаленных колес из труднообрабатываемой стали;
- 2) обеспечение точности сборной червячной фрезы при переточках за счет расчета ее рациональных геометрических параметров и учета влияния кинематических углов резания на боковых сторонах;
- 3) построение геометрических моделей срезаемых слоев и варианта силового взаимодействия режущих зубьев червячной фрезы;
- 4) разработка, изготовление и отладка экспериментального комплекса для измерения силы резания, анализ процесса зубофрезерования и проведения серии испытаний и прогнозирования стойкости фрезы;
- 5) использование результатов исследований в производственном и учебном процессах.

**Объект исследования** - операция зубофрезерования крупногабаритных зубчатых колес из закаленных труднообрабатываемых сталей сборными червячными фрезами.

**Предмет исследования** – стружкообразование, силовые характеристики резания и стойкостные характеристики инструмента в процессе зубофрезерования

крупногабаритных зубчатых колес червячными фрезами.

**Методы исследования.** Теоретические исследования базируются на основных положениях теории резания, теории проектирования режущих инструментов с использованием методов математического моделирования и графических программ на ЭВМ, теории механизмов и машин. При моделировании использована аналитическая и дифференциальная геометрия, векторная алгебра, регрессионный анализ. Для проектных работ использованы системы Mastercam и Компас -3D. Моделирование осуществлено в системе МКЭ Ansys и программном комплексе Creo Simulate. Обработка экспериментальных данных осуществлена с использованием методов математической статистики.

Экспериментальные исследования проведены на токарном станке с ЧПУ Top-Turn CNC-S16(C), вертикально-фрезерном многоцелевом станке VMC650E, плоскошлифовальном станке 3E71, зубофрезерном станке 5K32A. Измерения проведены на микроскопе УИМ-21 и КИМ «Master3DGage».

**Достоверность результатов** обеспечена обоснованным использованием аналитических зависимостей, применением методов математической статистики и подтверждается соответствием теоретических исследований экспериментальным результатам, полученных лично автором.

Диссертация состоит из четырех разделов.

В первом разделе приведен обзор известных способов и результатов измерения силы резания при зубофрезеровании.

Во втором разделе рассмотрены: кинематика зубофрезерования, взаимодействие зубьев червячной фрезы и определены кинематические задние углы резания.

В третьем разделе представлена разработка исследовательского комплекса, выбор и проектирование его компонентов, изготовление сборной червячной фрезы и технологической оснастки; приведены: план эксперимента; результаты испытаний и тарирования экспериментальной установки.

В четвертом разделе рассмотрено влияние геометрии сборных червячных фрез, числа зубьев и модуля нарезаемых колес, режимов резания на составляю-

щие силы резания, а также обеспечение точности боковых поверхностей нарезаемых зубьев.

- результаты геометрического анализа параметров новых и сточенных сборных червячных фрез;

- вариант синтеза силового взаимодействия режущих зубьев фрезы;

- конструкцию экспериментального комплекса для исследования составляющих силы резания и изучения процесса зубофрезерования, вариант выбора экспериментальных образцов и проведения испытаний;

- результаты экспериментальных исследований и зависимости для определения максимальной силы резания, учитывающие влияние параметров процесса резания на составляющие силы резания, микрогеометрию обработанной поверхности и точность зубчатого венца;

- рекомендации по выбору рациональных режимов резания

***Научная новизна диссертационной работы заключается в:***

- синтезе силового взаимодействия режущих зубьев фрезы вдоль линии станочного зацепления цилиндрических зубчатых колес при переходе от единичной впадины к колесу;

- зависимостях для расчета максимальной силы резания, обеспечивающих возможность прогноза стойкости инструмента до переточки при зубофрезеровании сборными червячными фрезами.

***Практическая значимость*** работы заключается в том, что получены результирующие зависимости для определения максимальной силы резания, учитывающие влияние параметров процесса резания на составляющие силы резания, позволяющие определить рациональные режимы резания для обеспечения одного или нескольких рабочих ходов при технологической подготовке производства крупногабаритных колес из закаленных сталей.

***Реализация работы.*** Рекомендации по назначению рациональных геометрических параметров инструмента и режима резания использованы в ОАО «Станкотехника» и АО «НПО «СПЛАВ» при модернизации действующих технологических процессов и подготовке производства крупногабаритных колес. Их внедре-

ние обеспечивает сокращение машинного времени зубофрезерования, повышение стойкости сборных червячных фрез.

Отдельные результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров техники и технологии по направлению 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», а также в научно-исследовательских работах студентов, при выполнении курсовых и дипломных проектов на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на: ежегодных научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава ТулГУ (2011 – 2016 г.г.); ежегодных магистерских научно-технических конференциях (г. Тула, ТулГУ, 2010 – 2014 г.г.); ежегодных молодежных научно-практических конференциях студентов Тульского государственного университета «Молодежные инновации» (г. Тула, ТулГУ, 2010 г. – 2015 г.г.); научно-практической конференции студентов Тульской области «Информационные технологии - в жизнь!» (г. Тула, Тульский государственный технический колледж им. С.И.Мосина, 2010 - 2011 г.г.); ежегодных международных научно-технических конференциях «АПИР» (г. Тула, ТулГУ, 2011-2012, 2014 г.г.); интернет-конференции по металлургии и металлообработке (г. Тула, ТулГУ, 2014 г.). Результаты работы выставлялись на: международном конвенте 9<sup>th</sup> EXPO-SCIENCES EUROPE 2012 (г. Тула, 2012 г.), международной индустриальной выставке «HANNOVER MESSE» (г. Ганновер, Германия, 2013 г.); первой ежегодной национальной выставке ВУЗПРОМЭКСПО 2013г, (г. Москва, 2013 г.); региональном и федеральном этапах выставки 100 лучших товаров России (г. Тула, 2013 г.); XVII Московском международном салоне изобретений и инновационных технологий «Архимед - 2014» (г. Москва, 2014 г.). За время обучения автор награжден: именной премией им. И. А. Коганова за лучшую разработку в области технологии машиностроения (2011 г.); медалью за лучший проект в секции «Machine Engineering» на международном конвенте 9<sup>th</sup> EXPO-SCIENCES EUROPE 2012; свидетельством и медалью лауреата регионального этапа выставки

100 лучших товаров России (2013 г.); золотой медалью XVII Московского международного салона изобретений и инновационных технологий «Архимед - 2014».

Работа выполнена в соответствии с грантом по программе «У.М.Н.И.К.» (государственный контракт №11419р/17125 от 31.01.2013).

Результаты диссертационной работы внедрены в разделы лекционного курса «Обработка сложных поверхностей» и лабораторных работах курса «Обработка заготовок на станках с ЧПУ» по направлению подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Опубликовано учебное пособие «Непрерывные технологии подготовки производства и обработки на станках с ЧПУ в машиностроении».

По теме диссертации опубликовано 22 научные статьи, в том числе 8 статей в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ объемом 6,46 печатных страниц в том числе личный вклад автора - 4,63 печатных страниц. В совместных опубликованных работах диссертант принимал активное участие.

Личный вклад автора в опубликованные работы, содержание диссертации и проведенные исследования заключается в следующем:

- проведен анализ известных технологических и экспериментальных исследований процесса зубофрезерования червячными фрезами, а также различных вариантов зубообработки;
- построена геометрическая модель формообразования сечений срезаемых слоев и получены компьютерные объемные модели стружки при формировании впадины зубчатого колеса витком червячной фрезы;
- предложен вариант учета силового взаимодействия зубьев одной рейки фрезы при зубофрезеровании зубчатого колеса;
- определены конструктивные параметры сборной червячной фрезы на основе компьютерного прогнозирования силовых нагрузок на инструмент;
- предложен вариант контроля положений базовых торцов зубчатых реек сборной червячной фрезы;
- разработана и собрана установка для экспериментальных исследований, результаты которых приведены в диссертационной работе;

- определены геометрические и конструктивные параметры заготовок для проведения экспериментальных исследований;

- получены силовые зависимости, отражающие влияние  $m$ ,  $S_0$ ,  $\gamma_a$ ,  $z_1$ , подачи СОЖ на составляющие силы резания  $P_x$  и  $P_z$ ;

- проведены исследования микрогеометрии и микротвердости нарезанных образцов.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка использованных источников из 69 наименований и включает 132 страницы печатного текста, содержащего 50 иллюстраций, 30 таблиц, 3 приложения, представленных на 7 страницах.

# I СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

## 1.1 Общие сведения о червячных фрезах и процессах зубофрезерования

В зависимости от типа производства и требуемой точности изготовления зубчатых колес широкое применение имеют четыре вида червячных фрез: монолитные со шлифованным профилем, сборные с поворотными вставными рейками, монолитные затылованные с нешлифованным профилем повышенной точности и твердосплавные червячные фрезы [16].

Перечисленные инструменты соответствуют отечественному и международному стандартам (ГОСТ 9324–80 и DIN 3968-1960-09), определяющим шесть классов точности червячных фрез — от AAA до D. При этом ГОСТ регламентирует величины погрешностей для фрез класса точности AAA, в то время как стандарт DIN оставляет параметры точности класса AAA на усмотрение поставщика. Большинство нормируемых параметров совпадают в рассматриваемых стандартах, при различии в обозначениях. Например, погрешность формы посадочного отверстия, погрешность продольных и поперечных шпоночных пазов, погрешность отдельных шагов нормируются по стандарту DIN и не ограничиваются в ГОСТ. ГОСТом регламентируется погрешность винтовой линии на трех оборотах, но не нормируется стандартом DIN.

Основными изготовителями червячных фрез, как монолитных, так и сборных, являются европейские фирмы: Klingelberg, Fette, Saazor - Германия, Samputensili – Италия (рис.1.1, а).

Российские производители монолитных червячных фрез: ОАО «Киржачский инструментальный завод», ООО «Белгородский завод фрез», ОАО «Свердловский инструментальный завод», ЗАО «Волгоградский инструментальный завод», ООО «ПромИнструмент Санкт-Петербург», ОАО «Ижевский инструментальный завод», ОАО «Московский инструментальный завод», АО "ИТО-Туламаш" и др. (рис. 1.1, б) [63-68].



Рис. 1.1. Зуборезный инструмент различных производителей:  
а – зарубежный; б – отечественный

В настоящее время производители выпускают множество червячных фрез различных конструкций с разнообразными техническими параметрами. Основными из них, определяющими назначение фрезы и область ее применения, являются:

- 1) исходный контур - для эвольвентных и неэвольвентных профилей;
- 2) конструкция - монолитная, составная, сборная.

Сборные фрезы с поворотными зубчатыми рейками в отличие от монолитных стандартных фрез, соответствующих ГОСТ 9324-80 изготавливаются только насадными с режущими рейками, расположенными параллельно оси корпуса. Такие фрезы подразделяются на 10 групп.

1. По назначению - чистовые, получистовые и черновые.
2. По способу последующей обработки заготовки - шевингованием, прикапыванием, шлифованием, чистовым зубофрезерованием.
3. По направлению винтовой линии - правые и левые.
4. По количеству винтовых линий или заходов - однозаходные и многозаходные.
5. По длине - короткие и длинные.
6. По переднему углу - с положительным, нулевым и отрицательным передним углом.

7. По инструментальному материалу режущей части фрезы - из быстрорежущей стали или твердого сплава.

8. По конструкции корпуса и крышек - для одноразового или многократного использования.

9. По наличию износостойкого покрытия - без покрытия, с однослойным или многослойным покрытием.

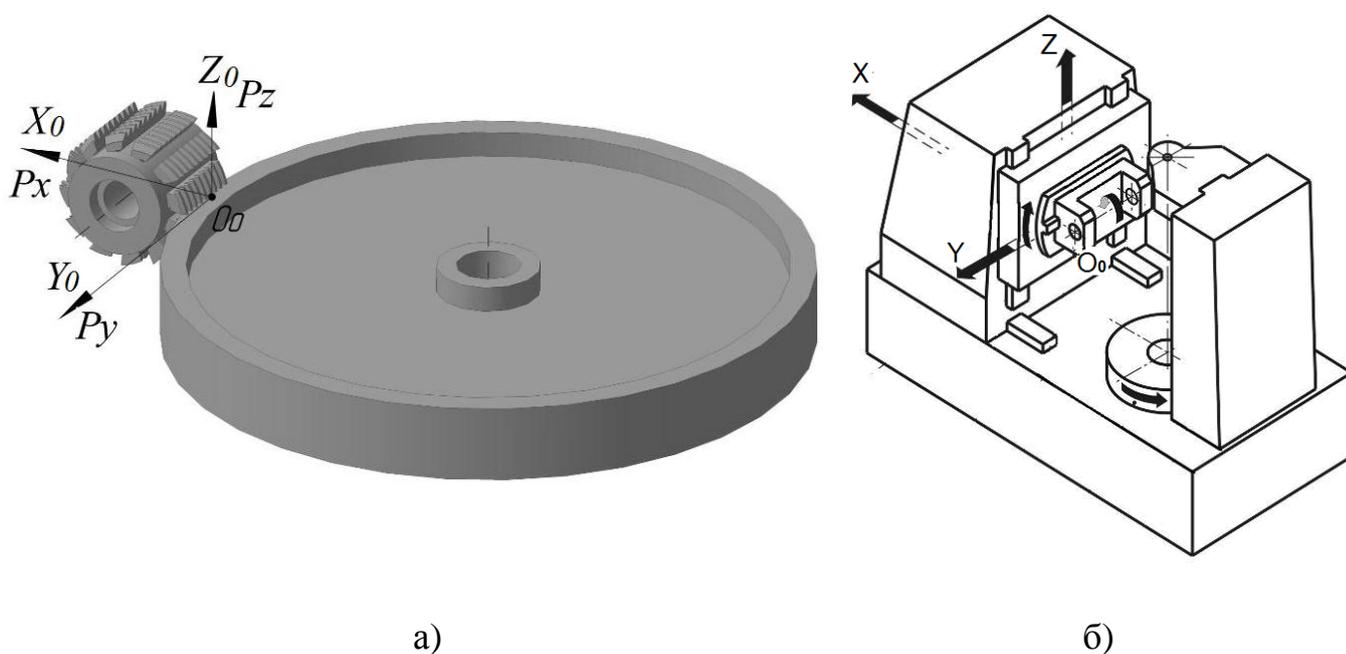
10. По форме производящего контура - стандартные и модифицированные. Основные модифицированные производящие контуры - для прогрессивной, вершино-нагруженной и раздельной схем резания [19].

## 1.2 Сила резания при зубофрезеровании

Измерение силы резания состоит в определении величины одной или нескольких ее составляющих в координатной системе станка. Первые измерения силы резания провел Ф. У. Тейлор на рубеже XIX-XX столетий, но они были косвенными. В серии экспериментов с изменяемыми условиями резания он наблюдал за изменениями потребляемого тока главным приводом станка и фиксировал его величину. Затем, при помощи установленного на станке динамометрического тормоза регулировал затормаживание до тех пор, пока преобразователь тока не показывал такое же значение, как при проведении опыта. По полученной величине момента на динамометрическом тормозе Тейлор рассчитывал силу резания, возникавшую во время механической обработки [69].

Сила резания при зубофрезеровании является геометрической суммой нормальных сил и сил трения, возникающих вследствие: упругих и пластических деформаций срезаемого металла; трения сходящей стружки о переднюю поверхность режущего инструмента; отрыва элементов стружки от общей массы. Составляющие силы резания, являющиеся ее проекциями на координатные оси, постоянно изменяются как по величине, так и по направлению. В системе координат  $O_0X_0Y_0Z_0$ , связанной с червячной фрезой (рис. 1.2) ось  $O_0Z_0$  параллельна верти-

кальной оси стола станка, ось  $O_0X_0$  параллельна межосевому перпендикуляру, ось  $O_0Y_0$  параллельна оси фрезы. Приняты следующие обозначения сил, действующих на червячную фрезу:  $P_z$  - составляющая, направленная в сторону противоположную вектору скорости резания и перпендикулярная оси фрезы;  $P_y$  - осевая составляющая, расположенная в плоскости касательной к цилиндру соосному производящей поверхности параллельная оси фрезы однонаправленная с вращением заготовки;  $P_x$  - радиальная составляющая, параллельная межосевому перпендикуляру заготовки и фрезы. Так, сила  $P_z$  нагружает механизм подачи станка и деформирует технологическую систему в направлении оси  $OZ$ , сила резания  $P_y$  воздействует на технологическую систему и вместе с  $P_z$  вызывает деформацию фрезерного суппорта, приспособления с заготовкой и инструмента в радиальном направлении (рис. 1.2) [61].



а)

б)

Рис. 1.2. Координатные системы:

а – фрезы; б – зубофрезерного станка

Рассмотрим направления составляющих силы резания при зубофрезеровании обкаткой (рис. 1.3) [51].

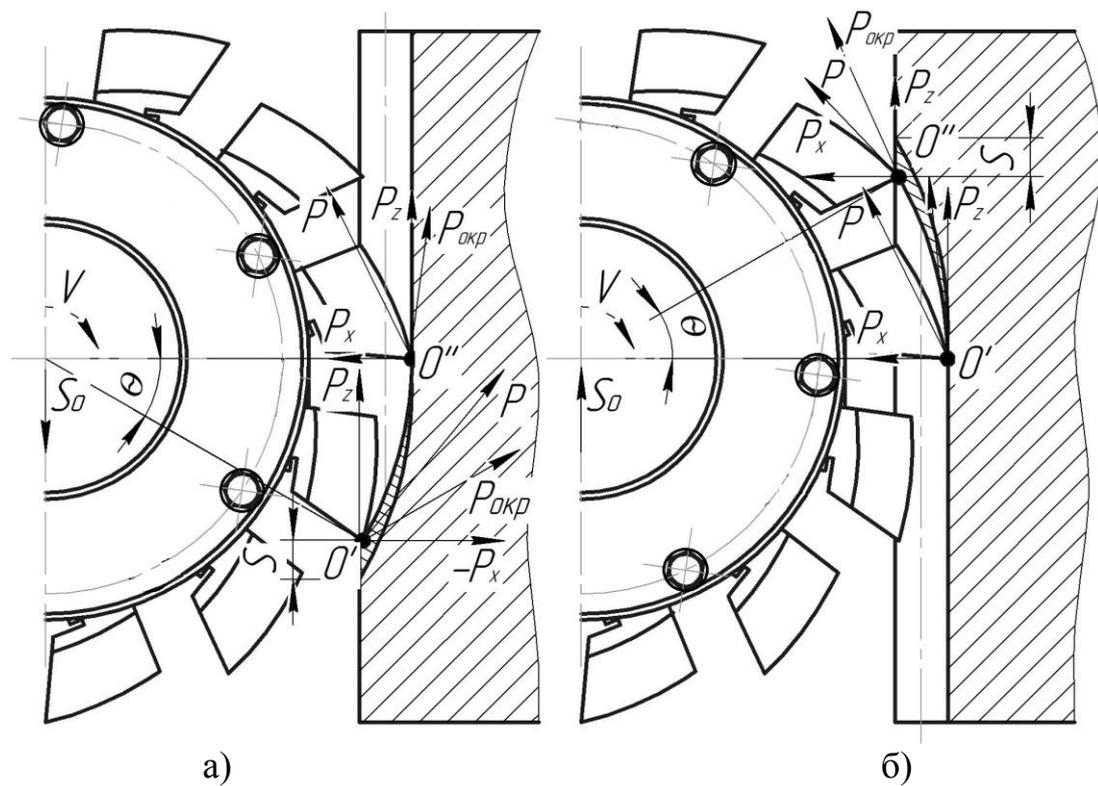


Рис. 1.3. Составляющие силы резания при фрезеровании с продольной подачей:  
 а – встречной; б - попутной

1. Зубофрезерование с осевой подачей осуществляется при движении червячной фрезы параллельно оси обрабатываемого колеса. Способ применяется для нарезания цилиндрических колес и шлицевых валов. Его особенностью является большая длина пути врезания, которая возрастает с увеличением диаметра червячной фрезы и угла наклона винтовой линии зуба.

С распространением зубофрезерных станков с ЧПУ к способу зубофрезерования с осевой подачей можно отнести фрезерование с переменной подачей. Фрезерование зубчатого колеса начинается на максимальной подаче, затем она постепенно уменьшается до некоторой постоянной величины. При постоянной подаче станок продолжает работать до начала выхода фрезы из контакта с заготовкой. В этот момент подачу снова автоматически повышают до максимальной величины. Увеличение подачи вызывает увеличение шероховатости боковых поверхностей зубьев у торцов зубчатого венца. Способ применяют для нарезания под последующее шевингование или шлифование колес с модулем до 5 мм, а

также для нарезания колес с большим углом наклона линии зуба, где путь врезания велик.

Зубофрезерование за два рабочих хода состоит в том, что первый и второй рабочие ходы осуществляются последовательно, причем второй рабочий ход производится при минимальном припуске. Первый рабочий ход производят на попутной подаче, второй - на встречной. Из-за малого припуска на втором рабочем ходе скорость резания и осевую подачу увеличивают по сравнению с первым. Горизонтальная составляющая силы резания  $P_x$  при этом достигает максимальной величины, а радиальная сила вызывает деформацию оправки станка. После начала резания, преодолевая сопротивление образованию стружки, радиальная сила резко падает, но затем растет с увеличением толщины срезаемых слоев металла. При попутном фрезеровании толщина срезаемого слоя металла в момент врезания зуба в заготовку максимальна и уменьшается по мере движения фрезы и ее выхода из заготовки, горизонтальная сила  $P_x$  не меняет направления [51, 61].

При встречном зубофрезеровании (см. рис. 1.3, б) величина силы  $P_x$  определяется силой трения от пластического скольжения режущих кромок фрезы о поверхность резания, а величина силы  $P_z$  определяется размерами срезаемого слоя. При встречном фрезеровании, скольжение зуба по поверхности резания до момента врезания в металл ведет к наклепу поверхности, и каждый последующий рез осуществляется по упрочненной поверхности, что приводит к увеличению силы резания.

2. Зубофрезерование с радиальным врезанием заключается в том, что подача червячной фрезы до получения полной высоты зуба осуществляется радиально к обрабатываемому колесу, затем она прекращается и включается осевая подача. Эффективность операции зубофрезерования при радиальном врезании выше, чем при осевом за счет сокращения пути врезания. Из-за повышенного износа зубьев червячной фрезы подачу выбирают в пределах 0,7 - 0,9 мм/об.

3. Диагональное фрезерование осуществляется при сообщении червячной фрезе одновременно двух подач: первой – продольной, т.е. параллельно оси наре-

заемого колеса, и второй – осевой, т.е. вдоль оси фрезы. Это обеспечивает равномерное изнашивание зубьев фрезы, способствует повышению ее стойкости, повышает точность нарезанных зубьев. Для осуществления диагонального зубофрезерования необходимы зубофрезерные станки, оснащенные суппортами, дающими возможность непрерывного осевого перемещения фрезы.

### 1.3 Степень разработанности темы исследования

Работы, связанные с изучением процесса зубофрезерования, ведутся в трех направлениях:

- построения моделей на основе аналитических, математических и численных методов;
- исследования имитационных моделей на основе метода конечных элементов, построенных для расчета площадей, объемов срезаемых слоев, деформации стружки и температуры режущих зубьев инструментов;
- повышения стойкости инструментов за счет определения оптимальных режимов резания, рационализации геометрии режущих кромок, нанесения износостойких покрытий на режущие зубья.

Проектированию, исследованию червячных фрез и процесса зубофрезерования посвящены работы многих отечественных ученых.

Башкиров В.Н. предложил модель, позволяющую анализировать геометрические параметры процесса обработки при заданных режимах резания и параметрах инструмента [9, 10, 51, 52]. Созданная им динамометрическая установка, обеспечивала одновременное измерение составляющих силы резания и крутящего момента на фрезе. В итоге Башкировым В.Н. разработана зависимость:

$$P_q = C_q \left( m^{\alpha_1} \left( \frac{t}{m} \right)^{\alpha_2} S_0^{\alpha_3} V^{\alpha_4} z_1^{\alpha_5} e^{\alpha_6} \right) (K_{q1}), \quad (1.1)$$

где  $C_q$  - коэффициент пропорциональности;  $K_{q1}$  - коэффициент, учитывающий влияние прочих факторов (схемы фрезерования, глубины фрезерования и т.д.);

$m$  - модуль фрезы и зубчатого колеса;  $S_0$  - осевая подача;  $z_1$  - число зубьев обрабатываемого колеса;  $V$  - скорость резания;  $\frac{t}{m}$  - относительная глубина резания;  $e$  - основание натурального логарифма.

В ходе исследований операции обработки крупномодульных колес установлено влияние: глубины фрезерования, скорости резания и числа зубьев колеса на силу резания.

Экспериментальные исследования и теоретические разработки, связанные с построением и анализом зон контакта фрезы и заготовки, проведены А.Г. Ничковым. Он рассматривал фрезу и заготовку как сплошные цилиндры, а «зону контакта» как плоскую фигуру, представляющую собой часть замкнутой области, ограниченную проекцией на плоскость, параллельную осям фрезы и заготовки, и линии пресечения наружных цилиндров фрезы и заготовки [23, 24]. В ходе исследований получены зависимости для определения составляющих силы резания.

С.Н. Медведицков, Н.Я. Смольников и Г.Г. Скребнев разработали эмпирические зависимости для определения составляющих сил резания при различной форме исходных контуров червячных фрез [20, 21, 57-59]. Это позволило учесть влияние на стойкость фрезы: скорости резания, подачи, модуля и числа зубьев нарезаемого колеса, геометрических параметров фрезы, направления подачи, марки и твердости обрабатываемого материала, СОЖ. В ходе проведения исследований установлено, что стойкость фрез с рациональными схемами резания выше стойкости стандартных фрез в 2-2,5 раза.

Э.Н. Гулида [13] систематизировал методики проведения силовых экспериментов для изучения процесса зубонарезания эвольвентных колес и колес с зацеплением Новикова с целью установления влияния технологических и конструктивных параметров фрезы на силу резания. Эксперименты выявили, что марка СОЖ, число зубьев нарезаемого колеса и скорость резания не влияют на силу резания и крутящий момент, а при затуплении фрезы увеличивается сила резания, так же, как и при увеличении модуля и твердости обрабатываемой заготовки.

Увеличение подачи  $S_0$  с 0,5 до 2,5 мм/об увеличивает составляющую  $P_z$  в 3,5 раза, а  $P_x$  и  $P_y$  в 2 раза. Увеличение глубины резания с 0,5 до 2,5 мм увеличивает силу резания в среднем в 1,5 раза. Эксперименты показали, что с увеличением износа червячной фрезы, составляющая силы резания  $P_z$  возрастает на 10%, а  $P_x$  и  $P_y$  - примерно на 20%, это происходит за счет увеличения силы трения по задним поверхностям зубьев. В результате получен общий вид зависимости:

$$P_q = C_q \left( m^{\alpha_1} (HB)^{\alpha_2} S_0^{\alpha_3} t \beta^{\alpha_4} \right) K_{q1}, \quad (1.2)$$

где  $C_q$  - коэффициент пропорциональности;  $K_{q1}$  - коэффициент, учитывающий влияние прочих факторов (схемы фрезерования, глубины фрезерования и т.д.);  $m$  - модуль фрезы и зубчатого колеса;  $S_0$  - осевая подача;  $HB$  - твердость нарезаемых колес;  $t$  - относительная глубина резания,  $\beta$  - угол наклона нарезаемых зубьев.

В работе Н.Д. Феофилова [27] представлен способ определения толщины срезаемого слоя для произвольной точки вершинной режущей кромки любого режущего зуба в осевом сечении и описан эксперимент по измерению составляющих силы резания. Экспериментальная установка, смонтированная на зубофрезерном полуавтомате 5К32, состоящая из универсального динамометра УДМ600, тензометрической станции ТА5 и светолучевого осциллографа Н 117/1, измеряла при фрезеровании колес с предварительно сформированными зубьями составляющие силы резания  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  и крутящий момент в зависимости от твердости заготовки и срезаемого припуска. Установлено, что увеличение твердости заготовки с HRC 20 до HRC 50 при неизменном припуске увеличивает силу резания в 2,1 раза. Увеличение припуска с 10 мкм до 80 мкм при неизменной твердости заготовки увеличивает  $P_x$  в 2,8 раза,  $P_y$  в 5,3 раза, а  $P_z$  в 58 раз. В результате исследований фрезерования резцовыми головками определено влияние силовых факторов на погрешности обработки цилиндрических зубчатых колес.

Экспериментальные исследования (табл. 1.1) с целью изучения процесса зубофрезерования червячными фрезами и определения силы резания, позволили получить эмпирические зависимости только для конкретной задачи [51]. Это связано с различными условиями проведения опытов, с количеством исследуемых составляющих силы резания, с числом исследуемых факторов, с конструкцией измерительной установки, с методикой и способом обработки экспериментальных данных.

Таблица 1.1

Результаты экспериментальных исследований отечественных ученых

Источник информации	Обрабатываемый материал		Исследуемые факторы				Измеряемые величины (см. рис.1.3)
	Сталь марки	Твердость НВ	$t$ , мм	$S_0$ , мм/об	$V$ , м/мин	$z_1$	
[8]	45	175	3-5	1-3		25-118	$P_x, P_y$
[6]	45	175	4-16	0,6-6		20-90	$P_x, P_{окр}$
	45X	180					
[28]	45	172	3-5	1-3	10,3-41,1	30-60	$P_x, P_y, P_{окр}$
	45X	195					
[22]	45	200	2,5-5	0,6-3	14,7-30,7	-	$P_{окр}$
[62]	40	-	1-2	0,24-0,6	10-21	38-60	$P_{окр}$
[56]	45	197-217	2-4,5	0,4-2	30-40	20-60	$P_{окр}$
[25]	40X	190-320	3-5,5	1-2,5	15-60	23-43	$P_{окр}$
	45						
[14]	45	190	1-4	0,5-1,5	12-35	37-155	$P_x, P_y, P_z$
	40X						
[29]	45	190-300	2-5	1-2,5	15-60	23-43	$P_x, P_y, P_z, P_{окр}$
	40X						
[18]	45	193	15	0,4-1,3	13-24	14-102	$P_x, P_{окр}$
[17]	40X	190	5-10	1-10	18-42	23-38	$P_{окр}$

Среди трудов зарубежных исследователей следует отметить, что в работе [30] с помощью статистического подхода определено изменение крутящего мо-

мента и средней величины силы резания при зубофрезеровании цилиндрических колес. Силу резания измеряли тензометрическим динамометром, а потребляемую приводом главного движения станка мощность - ваттметром. В ходе экспериментов исследовано влияние множества независимых переменных на максимальную силу резания и среднюю мощность: осевой подачи, модуля, твердости образцов, числа зубьев инструмента и скорости резания. Установлено, что увеличение числа зубьев нарезаемого колеса в 2 раза увеличивает крутящий момент на 43 % при скорости резания 30 м/мин, а увеличение частоты вращения инструмента с 74 об/мин до 178 об/мин при неизменном числе зубьев обрабатываемого колеса увеличивает крутящий момент на 51 %. В итоге разработана зависимость в виде

$$P_q = K \left( d_{a0}^{\alpha_1} z_1^{\alpha_2} V^{\alpha_3} \right), \quad (1.3)$$

где  $K$  - коэффициент пропорциональности,  $d_{a0}$  - диаметр окружности вершин зубьев фрезы,  $z_1$  - число зубьев обрабатываемого колеса,  $V$  - скорость резания.

В работе [35] анализ управляющих сигналов с приводов станков использован для выявления поломок червячной фрезы. В частности, описано применение тахометра для получения сигналов обратной связи при контроле обработки однозубой фрезой на вертикально-фрезерном станке с ЧПУ. Установлено, что между переточками составляющие силы резания  $P_x$  и  $P_y$  увеличиваются на 9 % и 7 % соответственно.

В работе [34] приведены результаты исследования стойкости зуборезных фрез между переточками. В экспериментах, воспроизводящих изнашивание режущих зубьев с покрытием TiAlN, выявлено влияние шероховатости передних и задних поверхностей режущих зубьев на составляющие силы резания. К окончанию периода стойкости инструмента без покрытия составляющие силы резания возросли:  $P_x$  - на 11 %, а  $P_y$  - на 7 %. Увеличение силы резания при работе инструментом с покрытием TiAlN не превысило 3 %. Уменьшение шероховатости передней и задней поверхностей зубьев фрезы уменьшает износ задней поверхности, но при этом существенного различия в силе резания не наблюдалось.

В работах [42, 43] авторами исследовано зубофрезерование на пятикоординатном станке с ЧПУ, с целью повышения производительности за счет увеличения стойкости инструмента между переточками. В частности, изучено влияние геометрии режущей части фрезы на износостойкость ее зубьев при работе без СОЖ на высокой скорости резания. Составляющие силы резания при этом изменялись в диапазонах:  $P_x=200\div 1000\text{ Н}$ ,  $P_y=180\div 400\text{ Н}$ ,  $P_z=250\div 1150\text{ Н}$ . Установлено, что качество заточки фрезы влияет на период ее стойкости.

Работа [49] посвящена исследованию влияния твердости заготовок на износ задней поверхности быстрорежущих червячных фрез с покрытиями AlN и TiN. Имитации зубофрезерования летучим резцом с подачей СОЖ и без подачи СОЖ установила незначительное влияние снижения термообработкой (отпуском) твердости заготовки с 161 НВ до 130 НВ на износ задней поверхности инструмента. При этом химический состав покрытия AlN или TiN также влияет не существенно в широком диапазоне скоростей резания, однако приводит к увеличению шероховатости боковых поверхностей нарезанных зубьев.

Теоретические исследования процесса зубофрезерования, представленные в работах [31, 36, 39, 40, 41], проведены с целью повышения производительности зубонарезания. Полученные зависимости учитывают: кинематику формирования зубьев колеса; изнашивание инструмента; применение новых инструментальных материалов и покрытий; оптимизацию геометрии инструментов; целесообразность восстановления передних и задних углов у фрез при переточках.

В работах [32 – 38 и 44 - 48] использованы прикладные программы для моделирования зубофрезерования прямозубых, косозубых и червячных колес, а также исследовано влияние исходного контура и геометрии инструментов на составляющие силы резания. Работы выполнены для недеформируемой стружки и без учета изнашивания инструмента.

В исследованиях червячного зубофрезерования следует отметить роль немецких ученых Opitz G., König W., Bouzakis K., Jorra K., Hoffmeister B. Их работы позволили определить толщины срезаемых слоев, рассчитать траектории пе-

риферийных режущих кромок, разработать прикладные программы для расчета основных параметров станочного зацепления, сил резания и зуборезных инструментов.

Анализ рассмотренных работ показывает, что авторы моделировали и экспериментально проверяли форму срезаемых стружек на различных режимах резания монолитными червячными фрезами или фрезами с единичным зубом как с использованием СОЖ, так и без СОЖ на универсальных фрезерных станках или фрезерных 5-и координатных станках с ЧПУ. Силу резания измеряли индуктивными, тензометрическими и пьезоэлектрическими датчиками.

Исходя из анализа литературы, в предлагаемой диссертации принят общий вид выражения для расчета составляющих сил резания:

$$P_q = C_q \left( \Phi_1^{\alpha_1} \Phi_2^{\alpha_2} \dots \Phi_n^{\alpha_n} \right) \cdot \left( K_{q_1} K_{q_2} \dots K_{q_u} \right), \quad (1.4)$$

где  $q$  - индекс соответствующей составляющей силы резания;  $C_q$  - коэффициент пропорциональности;  $\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_n$  - параметры процесса резания, от которых вид выражения  $P_q$  носит степенной характер;  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  - показатели степени при параметрах;  $K_{q_1} K_{q_2} \dots K_{q_u}$  - коэффициенты, учитывающие влияние прочих параметров (схемы фрезерования, глубины фрезерования и т.д.).

В диссертационной работе учитываются следующие независимые параметры, определяющие технические ограничения: модуль зубчатого колеса  $m$ , подача  $S_0$ , передний угол  $\gamma_a$ , число зубьев колеса  $z_1$ , наличие или отсутствие СОЖ, твердость заготовок. Тогда зависимости, определяющие максимальные величины составляющих силы резания при зубофрезеровании сборными червячными фрезами, примут вид:

$$P_x = C_x \left( S_0^{\alpha_1} \cdot (C + \gamma_a)^{\alpha_2} \cdot z_1^{\alpha_3} \cdot m^{\alpha_4} \cdot K_{нв}^{\alpha_5} \cdot K_s \right), \quad (1.5)$$

$$P_z = C_z \left( S_0^{\alpha_1} \cdot (C + \gamma_a)^{\alpha_2} \cdot z_1^{\alpha_3} \cdot m^{\alpha_4} \cdot K_{нв}^{\alpha_5} \cdot K_s \right), \quad (1.6)$$

где  $P_x$  и  $P_z$  - составляющие силы резания, соответствующие осям  $O_0Z_0$  и  $O_0X_0$ .

## 1.4 Измерение силы резания

Для измерения сил резания в процессе червячного зубофрезерования, различными авторами было предложено несколько способов [6, 13, 51].

Способ уравнивания основан на определении ускорения тела в инерциальной системе. Силу, которую необходимо измерить, сравнивают с другой, направленной в противоположную сторону в момент измерения. В этом случае ускорение равно нулю.

Способ торможения основан на измерении величины крутящего момента при помощи тормозных устройств. Вначале производят фрезерование зуба колеса, регистрируя силу тока и мощность, потребляемую двигателем станка. Далее вместо фрезы устанавливают тормоз с силоизмерительным устройством и моделируют работу на станке на тех же режимах, нагружая тормоз до тех пор, пока сила тока и мощность достигнут тех же величин, что и при фрезеровании. Затем определяют крутящий момент, который в приближении равен крутящему моменту при обработке.

Способ пластических деформаций основан на измерении отпечатка шарика и используется при измерении составляющих силы резания во времени. Между передающей системой и опорной плоскостью с металлическим шариком помещают пластинку из мягкого металла, например, меди. Наличие сил трения и крутящего момента приводит шарик в движение, который оставляет отпечаток на пластинке. Измерение диаметра отпечатка дает представление о средней величине силы резания.

Способ анализа потребляемой мощности станка, дающий возможность, во-первых, определить долю мощности резания, а во-вторых, окружную силу резания.

Широкое распространение получил способ, основанный на измерении упругих деформаций тензометрических датчиков под действием сил резания; при этом в датчиках протекают различные физические процессы, анализ которых позволяет определить составляющие силы резания.

## Выводы по 1 разделу

1. Анализ работ по исследованию процесса зубофрезерования показал недостаточность технологической информации о нарезании крупногабаритных зубчатых колес с повышенной твердостью. Теоретические и экспериментальные исследования основывались на анализе проекций геометрических сечений, ограниченных следами плоскостей резания режущими кромками червячной фрезы, на плоскость перпендикулярную оси зубчатого колеса или осевую плоскость фрезы.

2. Из известных зависимостей, полученных при исследовании зубофрезерования образцов летучими резцами, не ясно, каким образом учтено взаимодействие зубьев инструмента при перенесении результатов на фрезу в целом. Поэтому необходимо провести дополнительные исследования влияния физико-механических свойств и геометрических параметров зубчатых колес на конструкцию инструмента и режим его эксплуатации для:

- обеспечения точности сборной червячной фрезы при переточках;
- построения геометрических моделей срезаемых слоев и синтеза силового взаимодействия режущих зубьев червячной фрезы;
- разработки, изготовления и отладки экспериментального комплекса по исследованию силы резания при зубофрезеровании;
- провести серии испытаний для определения составляющих силы резания и прогнозирования стойкости фрезы;
- реализации результатов исследований.

## II КИНЕМАТИКА ЧЕРВЯЧНОГО ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

### 2.1 Кинематика резания

При обработке зубчатых колес по методу обкатки (рис. 2.1) режущие кромки инструмента, расположенные на его винтовой производящей поверхности, последовательно занимают положения, соответствующие профилю сопряженной с обрабатываемым колесом зубчатой рейки. Зубофрезерование обкаткой реализуется как на зубофрезерных станках с ЧПУ, так и на зубофрезерных станках с электромеханической системой управления [16, 57].

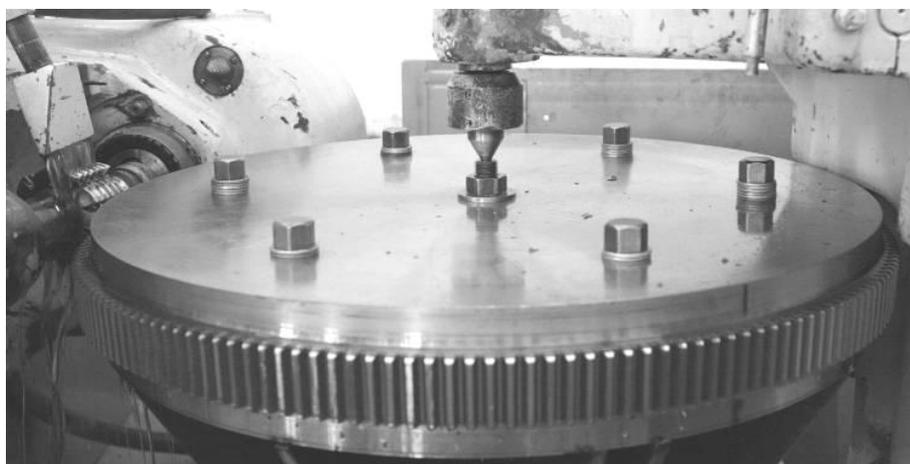


Рис. 2.1. Нарезание зубчатого колеса червячной фрезой

Для каждого цикла машинное время зубонарезания изменяется в широких пределах, а экономичность операции в большей степени зависит от конструкции инструмента, его размерной и технологической стойкости, чем от технических возможностей станка. Основными параметрами инструментов являются: диаметр, число режущих зубьев, инструментальный материал и упрочняющее покрытие, а также кинематические параметры резания - схема срезания припуска, передние и задние углы резания. При этом у червячной фрезы число заходов рекомендуется принимать не кратным числу зубьев нарезаемой заготовки [57].

Циклы зубофрезерования в зависимости от ширины зубчатого венца или ширины обрабатываемого пакета колес, могут осуществляться с радиальным врезанием; с продольной подачей; с продольной

Для операции зубофрезерования важна технологическая гибкость оборудования, заключающаяся в способности станков производить заданное множество деталей разными способами, т. е. выполнять в одном или последовательных циклах зубофрезерования различные переходы обкаткой и копированием, переналаживаться на различные модули и различное число зубьев.

Технологическая подготовка операции фрезерования на станке с ЧПУ отличается от подготовки операции на станке с электромеханическим управлением. Использование ЧПУ сокращает время на наладку станка, которая состоит во введении с пульта управления в диалоговом режиме команд в систему управления станка. Управляющая программа может быть введена также по кабелю с центрального пульта управления и с помощью переносной съемной памяти.

Однопроходное черновое и чистовое фрезерование осуществляют до модуля 4 мм. При модуле свыше 4 мм фрезерование осуществляется в несколько проходов. Предварительное зубофрезерование под последующее шевингование или шлифование можно выполнять в один проход и при модуле более 4 мм [57].

Эффективное использование зубофрезерных станков с ЧПУ возможно при применении инструментов с высокой размерной стойкостью, обеспечивающих большое количество передвижек и подналадок, имеющих одинаковые конструктивные особенности и технологию изготовления.

Основными эксплуатационными параметрами монолитных и сборных фрез, определяющими их стойкость между переточками, являются: задний и передний углы при вершине зубьев, длина режущей части реек, запас ширины рейки на переточки.

Кинематика резания рассматривает движения в цикле зубообработки с момента вступления режущего зуба в контакт с заготовкой, и до момента, когда контакт инструмента с заготовкой прекращается. В процессе резания механизм станка сообщает закрепленному на нем инструменту движение подачи и вращательное движения заготовке. Совместно эти движения сообщают фрезе результирующее движение резания относительно заготовки.

## 2.2 Влияние взаимодействия зубьев червячной фрезы на суммарную силу резания

Существующие способы исследования и построения профилей зубчатых деталей могут быть сведены к трем основным: графическому; графоаналитическому; аналитическому. Для графического исследования профиля использован пакет АСКОН «Компас-3D», для аналитических расчетов – пакет Mathcad Professional. Анализ схемы срезания припуска по методу обкатки, построенной как ряд последовательных положений следов поверхностей резания кромками зубьев червячной фрезы, показывает, что с каждым резом геометрические размеры срезаемых слоев изменяются (рис. 2.2) [37, 38]. Размеры стружек, срезаемых вершинной кромкой, изменяются от максимальных в начале резания до минимальных при центральном положении зуба инструмента во впадине колеса.

Номер витка	Порядковый номер зуба по линии зацепления											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1												
2												

Рис. 2.2. Модели срезаемых стружек, полученные графическим методом

Исходными данными для графоаналитического построения процесса вырезания впадины обкаткой являются: число зубьев и модуль нарезаемого колеса; профиль, число реек и число заходов сборной червячной фрезы (рис 2.3).

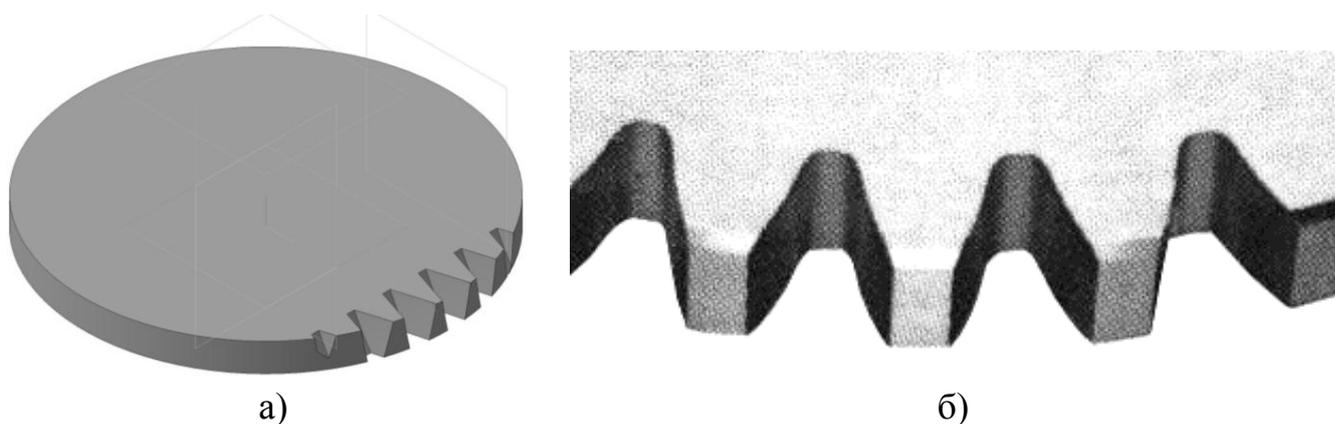


Рис. 2.3. Совокупность впадин зубчатого колеса:

а – графоаналитическое построение вырезания впадины; б – зубчатое колесо

При имитации обкатки угловой шаг колеса, соответствующий одному резу червячной фрезы:

$$\theta_1 = \frac{2\pi}{z_1 \cdot z_0}, \quad (2.1)$$

где  $z_1$  - число нарезаемых зубьев,  $z_0$  - число зубчатых реек.

Соответственно осевой шаг реек фрезы в пределах осевого хода:

$$\Delta p_o = \frac{\pi \cdot m}{z_0 \cos(\gamma_{m_0})}. \quad (2.2)$$

Для фрез с числом реек 10 и 12 при помощи графической обкатки построены профили единичных впадин колес  $m = 2,75$  мм с числами зубьев  $z_1$  от 30 до 112 при осевой подаче  $S_o = 1 - 4$  мм/об. Результаты построения стружек при вырезании единичной впадины сборными червячными фрезами, приведены в таблицах 2.1 - 2.6. Эти данные необходимы для того, чтобы определить общее количество срезаемых слоев, а, следовательно, и единичных сил резания, при зубонарезании колес с различным числом зубьев в зависимости от подачи и числа режущих реек фрезы. Во время зубофрезерования количество резов инструмента необходимое для формирования полной глубины впадины зависит от количества режущих реек, диаметра обрабатываемого колеса, величины подачи на оборот заготовки.

Таблица 2.1

Количество срезаемых слоев при продольной подаче  $S_o = 1 \text{ мм/об}$ 

12 реек									
$z_1=30$	$z_1=40$	$z_1=50$	$z_1=60$	$z_1=70$	$z_1=80$	$z_1=90$	$z_1=100$	$z_1=110$	$z_1=112$
17	17	17	18	20	20	20	20	21	24
18	18	18	19	21	21	21	21	22	24
18	19	19	20	22	22	22	22	23	24
19	19	20	20	23	23	23	23	24	24
19	20	23	21	23	23	23	24	25	25
19	20	21	21	24	24	25	24	25	26
20	21	21	22	24	24	25	25	26	26
20	21	22	22	25	25	25	26	27	27
20	21	22	23	25	25	25	26	27	28
21	22	22	23	26	26	26	27	28	28
21	22	23	24	26	26	27	28	28	29
21	22	23	24	27	27	28	28	29	29
22	23	23	24	27	28	28	28	29	30
22	23	24	25	27	28	28	29	30	31
22	23	24	25	28	28	28	29	30	31
22	24	25	26	28	29	29	30	31	32
23	24	25	26	29	29	30	30	31	31
23	24	25	26	29	30	30	31	32	33
23	25	26	27	29	30	31	32	32	33
24	25	26	27	30	30	31	32	33	33
24	25	26	27	30	31	31	32	33	34
24	25	27	28	31	31	32	33	33	33
24	26	27	28	31	32	33	33	34	34
25	26	27	29	32	32	33	34	35	34
25	26	28	29	32	33	33	34	36	34
Сумма									
536	561	584	604	669	677	687	701	724	737

Таблица 2.2

Количество срезаемых слоев при продольной подаче  $S_o = 2 \text{ мм/об}$ 

12 реек									
$z_1=30$	$z_1=40$	$z_1=50$	$z_1=60$	$z_1=70$	$z_1=80$	$z_1=90$	$z_1=100$	$z_1=110$	$z_1=112$
17	17	17	18	20	20	20	20	21	20
18	19	19	20	22	22	22	22	23	23
19	20	23	21	23	23	23	24	25	25
20	21	21	22	24	24	25	25	26	26
20	21	22	23	25	25	25	26	27	28

21	22	23	24	26	26	27	28	28	29
22	23	23	24	27	28	28	28	29	30
22	23	24	25	28	28	28	29	30	31
23	24	25	26	29	29	30	30	31	31
23	25	26	27	29	30	31	32	32	33
24	25	26	27	30	31	31	32	33	34
24	26	27	28	31	32	33	33	34	34
25	26	28	29	32	33	33	34	36	34
Сумма									
278	292	304	314	346	351	356	363	375	378

Таблица 2.3

Количество срезаемых слоев при продольной подаче  $S_o = 3$  мм/об

12 реек									
$z_1=30$	$z_1=40$	$z_1=50$	$z_1=60$	$z_1=70$	$z_1=80$	$z_1=90$	$z_1=100$	$z_1=110$	$z_1=112$
17	17	17	18	20	20	20	20	21	20
19	19	20	20	23	23	23	23	24	24
20	21	21	22	24	24	25	25	26	26
21	22	22	23	26	26	26	27	28	28
22	23	23	24	27	28	28	28	29	30
22	24	25	26	28	29	29	30	31	32
23	25	26	27	29	30	31	32	32	33
24	25	27	28	31	31	32	33	33	33
25	26	28	29	32	33	33	34	36	36
Сумма									
193	202	209	217	240	244	247	252	260	262

Таблица 2.4

Количество срезаемых слоев при продольной подаче  $S_o = 4$  мм/об

12 реек									
$z_1=30$	$z_1=40$	$z_1=50$	$z_1=60$	$z_1=70$	$z_1=80$	$z_1=90$	$z_1=100$	$z_1=110$	$z_1=112$
17	17	17	18	20	20	20	20	21	20
19	20	23	21	23	23	23	24	25	25
20	21	22	23	25	25	25	26	27	28
22	23	23	24	27	28	28	28	29	30
23	24	25	26	29	29	30	30	31	31
24	25	26	27	30	31	31	32	33	34
25	26	28	29	32	33	33	34	36	36
Сумма									
150	156	164	168	186	189	190	194	202	204

Таблица 2.5

Количество срезаемых слоев для 12 режущих реек фрезы.

$z_1 \backslash s_0$	1	2	3	4
30	461	278	193	150
40	561	292	202	156
50	584	304	209	164
60	604	314	217	168
70	669	346	240	186
80	677	351	244	189
90	687	356	247	190
100	701	363	252	192
110	724	375	260	202
112	737	378	262	204

Таблица 2.6

Количество срезаемых слоев для 10 режущих реек фрезы.

$z_1 \backslash s_0$	1	2	3	4
30	448	233	162	125
40	515	263	187	144
50	533	276	191	149
60	550	285	196	152
70	567	295	204	158
80	581	301	208	161
90	591	306	211	164
10	605	315	218	170
110	622	323	225	174
112	626	325	227	176

В зависимости от продольной подачи у зубчатых колес с одинаковым числом зубьев количество срезаемых стружек необходимых для формирования полной глубины впадины - различное. За один оборот фреза поворачивается на 1 шаг, однозаходный червяк последовательно сцепляется со всеми зубьями колеса, поэтому впадины вырезаются всеми зубьями однозаходной червячной фрезы на участке линии зацепления. Точки режущих кромок, расположенные на цилиндрической поверхности постоянного радиуса описывают винтовую траекторию. Точки касания соответствуют точкам активной линии зацепления. Длина линии зацепления [26] (рис. 2.4, а):

$$l = 2\pi m \cos(\alpha). \quad (2.3)$$

Число контактных точек [26]:

$$z_{проф} = n_{проф} z_o. \quad (2.4)$$

Для исключения влияния на стружкообразование сил резания на соседних зубьях образцы, имитирующие обрабатываемые заготовки зубчатых колес, имеют ширину

$$S_3 = \frac{P}{2} + 2\rho_{a0}, \quad (2.5)$$

где  $\rho_{a0} = 0,38m$  - радиус округления головки зуба.

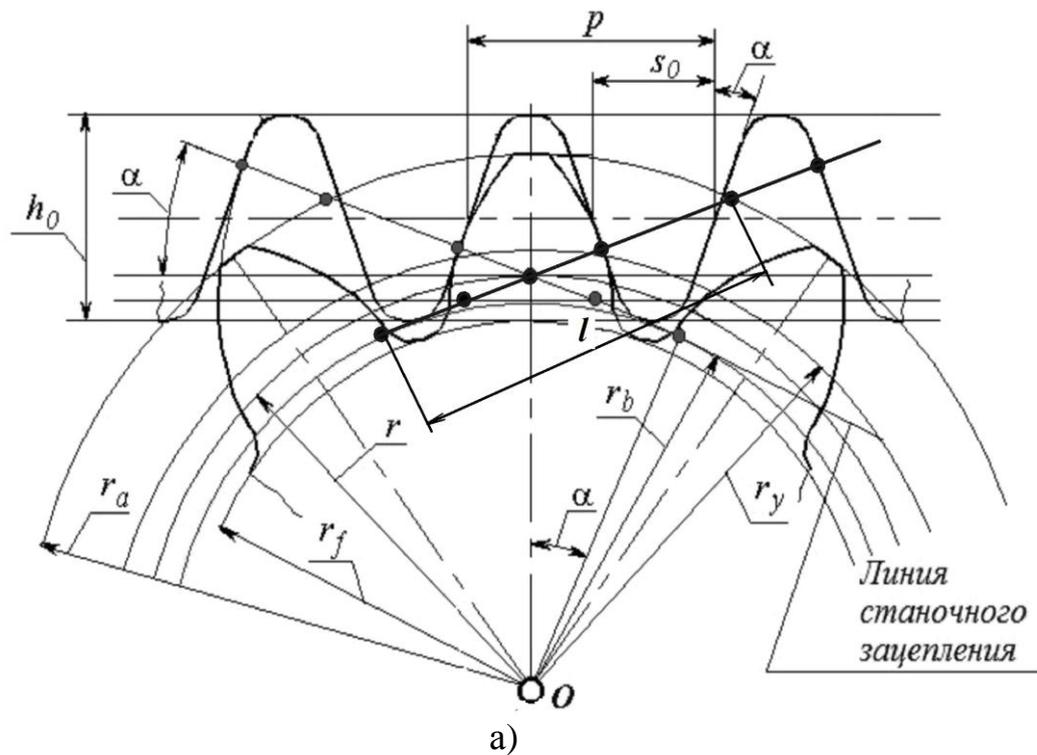


Рис. 2.4. Станочное зацепление:

а - линия зацепления; б - компьютерная модель зацепления инструмента с колесом

Из анализа точек контакта в универсальной программной системе МКЭ Ansys сделан вывод, что при ширине зубчатого венца превышающей радиус фрезы  $r_a$  в работе участвуют одновременно две зубчатые рейки, но в работе этот случай не рассмотрен (рис. 2.4, б).

При переходе от единичной впадины к зубчатому венцу необходимо сложить вдоль линии зацепления максимальные величины единичных сил, приходящиеся на один оборот заготовки, так как количество срезаемых стружек равно количеству единичных сил резания (см. табл. 2.1 - 2.6). Например, для прямозубого зубчатого колеса с модулем  $m = 2,75 \text{ мм}$  и числом зубьев  $z_1 = 112$  при установившемся резании количество единичных сил резания  $P'$  равно 24 за один оборот заготовки. Величину единичной силы резания в каждый момент времени, при вырезании единичной впадины, определим экспериментально при проведении серий опытов.

Допустим, величины составляющих силы резания, возникающей при срезании слоя металла каждым зубом витка фрезы известны. Схема вырезания впадины зубчатого колеса (рис. 2.5, а) червячной фрезой складывается из единичных резов и соответственно единичных сил, возникающих при резании каждым зубом рейки червячной фрезы.

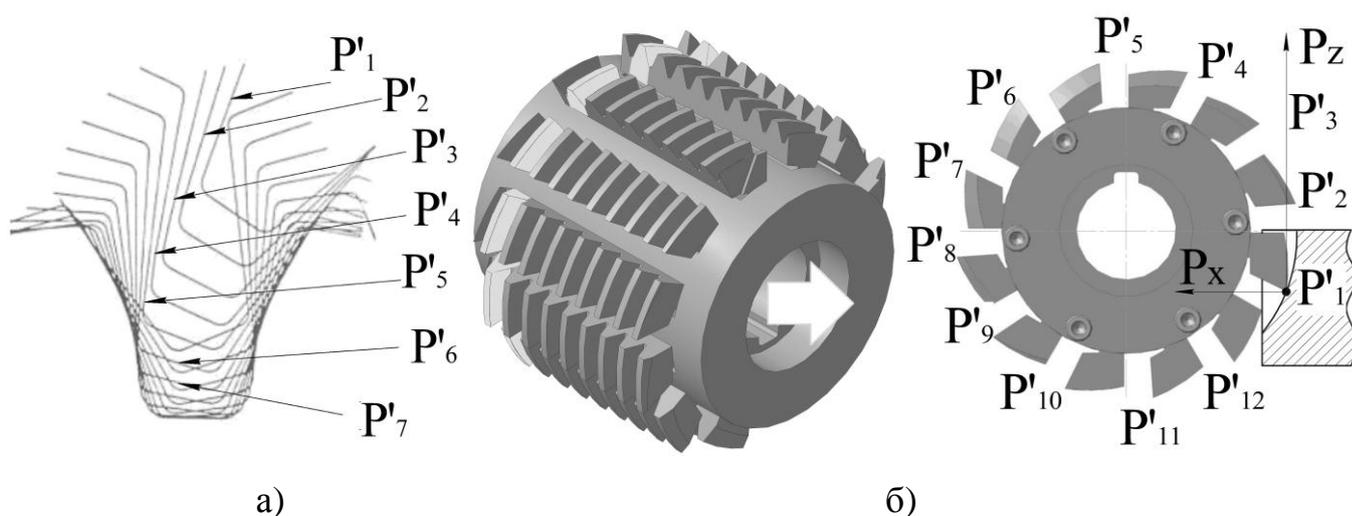


Рис. 2.5. Вырезание впадины колеса витком червячной фрезы

а – схема вырезания впадины; б – схема расположения зубьев фрезы по витку

Стружки срезаются каждым зубом витка с единичной силой  $P'_n$ . Величина единичной силы резания берется по модулю из осциллограммы текущего опыта.

Первый зуб витка срезает слой металла с силой  $P'_1$  согласно схеме резания (см. рис. 2.5, а), второй зуб витка с силой  $P'_2$  и т.д., тогда в общем виде (см. рис.2.5, б):

$$\sum_{i=1}^{n_k} P_i = |P'_{n_k}| + |P'_{n_k-1}| + |P'_{n_k-2}|, \quad (2.6)$$

где  $n_k$  - номер рейки;  $P'_{n_k}$  - сила резания при вырезании  $n$ -ой рейкой единичной впадины. При  $n_k = z_0 + 1$  вступает следующий виток фрезы. Например, сила резания  $P_z$  для первой рейки  $P_1 = P'_{1z}$ . Для второй рейки  $P_2 = |P'_{2z} + P'_{1z}|$ . Для третьей рейки  $P_3 = |P'_{3z} + P'_{2z} + P'_{1z}|$ . Для четвертой рейки  $P_4 = |P'_{4z} + P'_{3z} + P'_{2z}|$ . Для пятой рейки  $P_5 = |P'_{5z} + P'_{4z} + P'_{3z}|$ . и т.д., аналогично и для  $P_y$ . Затем в работу вступает следующий виток фрезы. Сила резания на первой рейке второго витка червячной фрезы  $P_{13} = |P'_{13z} + P'_{12z} + P'_{11z}|$ , на последней (двенадцатой) рейке второго витка.  $P_{24} = |P'_{24z} + P'_{23z} + P'_{22z}|$ . Аналогично рассчитывается сила резания для следующего оборота заготовки.

Для определения величин единичных сил необходимо провести экспериментальные исследования.

### 2.3 Кинематические задние углы экспериментальной фрезы

Кинематические углы резания определяют условия схода стружки и стойкость фрезы между переточками, что может оказать влияние на идентичность проведения серий опытов экспериментальными фрезами [27].

Кинематический задний угол  $\alpha_k$  - это угол между результирующими векторами, один из которых получен пересечением касательной к задней винтовой

поверхности и плоскостью касательной к цилиндру, в которой расположен вектор скорости, а второй получен пересечением касательной к винтовой технологической поверхности и плоскости к тому же цилиндру.

После затачивания фрезы по передней поверхности изменяются кинематические задние углы (рис. 2.6).

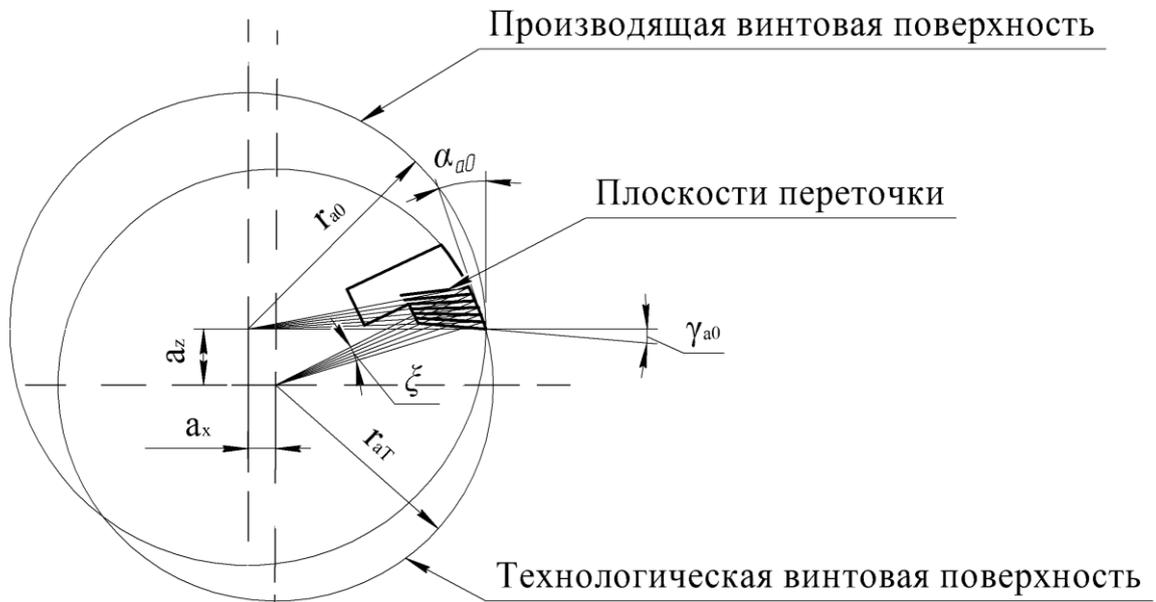


Рис. 2.6. Схема затачивания сборной фрезы по передней плоскости

Затачивание по передней поверхности фрезы осуществлено на заточном станке. Прямолинейная образующая конической поверхности шлифовального круга располагалась в текущей расчетной передней плоскости.

Исходными данными для расчета заднего угла являются: диаметр фрезы  $d_{a0}$ ; задний угол на окружности вершин зубьев фрезы  $\alpha_{a0}$ ; осевой шаг зубьев фрезы  $p_{x0}$ ; координаты точек профиля зуба фрезы  $x_{xy0}$ ,  $y_{xy0}$ ,  $z_{xy0}$  в осевой плоскости в системе координат фрезы  $O_0x_0y_0z_0$ ; число точек на левой, вершинной и правой кромках фрезы  $k_{L0}$ ,  $k_{a0}$ ,  $k_{R0}$ ; направление винтовых линий фрезы (правое, левое);

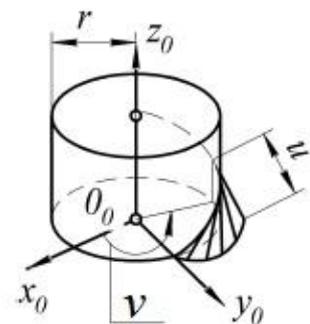


Рис. 2.7. К аналитическому описанию винтовой поверхности

передний угол на вершине зуба фрезы  $\gamma_{a0}$ ; осевая высота профиля режущего зуба фрезы  $h_0$ ; радиус технологической винтовой поверхности  $r_{aT}$  для фрез с поворотными зубчатыми рейками.

Для исследования изменения кинематических задних углов в зависимости от технологических факторов операции зубофрезерования запишем уравнение производящей винтовой поверхности, из которого найдем координаты точек правой и левой режущих кромок новой и переточенной фрезы [12, 16]:

$$\left. \begin{aligned} x_{0RL} &= (r_{b0} \cos(v_{RL}) + u_{RL} \cos \gamma_{b0} \sin(v_{RL})), \\ y_{0RL} &= p_{zx0} v_{RL} - u_{RL} \sin \gamma_{b0}, \\ z_{0RL} &= r_{b0} \sin(v_{RL}) - u_{RL} \cos \gamma_{b0} \cos(v_{RL}). \end{aligned} \right\} \quad (2.20)$$

где  $u$  – длина образующей прямой;  $v$  – угол, характеризующий положение точки на некотором цилиндре винтовой поверхности, измеряемый в торцовой плоскости поверхности (рис. 2.7).

Уравнение производящей поверхности червяка для переточенной фрезы

$$\left. \begin{aligned} x_{\alpha RL} &= x_{0RL} \cos \alpha_0 + z_0 \sin \gamma_{\alpha_0}, \\ y_{\alpha RL} &= y_{0RL}, \\ z_{\alpha RL} &= -x_{0RL} \sin \alpha_0 + z_{0RL} \cos \gamma_{\alpha_0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.21)$$

где  $\gamma_{\alpha_0}$  - угол стачивания за одну переточку.

$$\left. \begin{aligned} x_{\xi RL} &= x_{\alpha} \cos \xi + z_{\alpha} \sin \xi, \\ y_{\xi RL} &= y_{\alpha RL} \pm \frac{0.5 p_{x0} \xi}{\pi}, \\ z_{\xi RL} &= -x_{\alpha RL} \sin \xi + z_{\alpha RL} \cos \xi. \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

Червячная фреза профилируется в технологическом положении зубчатых реек, задняя поверхность которых расположена на винтовой поверхности.

Уравнение смещения координат производящей поверхности в переднюю плоскость фрезы

$$z_0 = (x_0 - r) \operatorname{tg} \xi, \quad (2.23)$$

где  $\xi$  – угол поворота осевой плоскости в переднюю плоскость, определяется из совместного решения уравнений (2.22) и (2.23):

$$\xi = \arcsin\left(\frac{-b - \sqrt{D}}{2a}\right) - \gamma_{a0}, \quad (2.24)$$

Решением будет являться:

$$\left. \begin{aligned} a &= -(-x_{0RL} - z_{0RL} \operatorname{tg} \gamma_{a0})^2 - (z_{0RL} - x_{0RL} \operatorname{tg} \gamma_{a0})^2, \\ b &= 2(z_{0RL} - x_{0RL} \operatorname{tg} \gamma_{a0}) r_{a0} \operatorname{tg} \gamma_{a0}, \\ c &= r_{a0}^2 \operatorname{tg}^2 \gamma_{a0} + (-x_{0RL} - z_{0RL} \operatorname{tg} \gamma_{a0})^2, \\ D &= b^2 - 4ac. \end{aligned} \right\} \quad (2.25)$$

Кинематические углы резания определяют стойкость фрезы между переточками, что может оказать влияние на идентичность проведения серий опытов экспериментальными фрезами (рис. 2.8) [27].



Рис. 2.8. Схема к определению кинематических задних углов резания

Независимо от вида производящей поверхности из-за наличия передних углов, величин стачивания и погрешностей изготовления фрезы режущая кромка

всегда является криволинейной. В связи с этим ее представление при расчете фрезы возможно в двух вариантах: как непрерывная и как дискретная, состоящая из прямолинейных отрезков.

В диссертации использованы зависимости [27], которые уточнены, а режущие кромки рассмотрены как непрерывные. В этом случае в произвольной точке  $M_0$  кинематический задний угол - это угол между направляющими векторами  $\alpha_{0k}$  и  $\alpha_{Tr}$  рассчитывается как

$$\alpha_k = \arccos \left( \frac{a_{x0r}a_{xTr} + a_{y0r}a_{yTr} + a_{z0r}a_{zTr}}{\sqrt{a_{x0r}^2 + a_{y0r}^2 + a_{z0r}^2} \cdot \sqrt{a_{xTr}^2 + a_{yTr}^2 + a_{zTr}^2}} \right), \quad (2.7)$$

где  $a_{x0r}$ ,  $a_{z0r}$ ,  $a_{z0r}$  и  $a_{xTr}$ ,  $a_{zTr}$ ,  $a_{zTr}$  направляющие коэффициенты результирующих векторов.

За направляющий вектор принимаем векторное произведение  $a_{0r} = N_0 \times N_r$  пересечения плоскости касательной к производящему червяку  $0_0 x_0 y_0 z_0$  и плоскости касательной к цилиндру радиуса  $r_y$ , в которой лежат вектор скорости резания и вектор относительного движения

$$a_{0r} = \left\{ \begin{array}{cc|cc} n_{y0} & n_{z0} & n_{z0} & n_{x0} \\ 0 & n_{zr} & n_{zr} & n_{xr} \end{array} \middle| \begin{array}{cc|cc} n_{x0} & n_{y0} & n_{xr} & 0 \end{array} \right\}, \quad (2.8)$$

$$a_{x0r} = n_{y0}n_{zr}, \quad a_{z0r} = n_{z0}n_{xr} - n_{x0}n_{zr}, \quad a_{z0r} = -n_{y0}n_{xr}.$$

За направляющий вектор принимаем векторное произведение  $a_{Tr} = N_T \times N_r$  пересечения плоскости касательной к технологическому червяку  $0_T x_T y_T z_T$  и плоскости касательной к цилиндру радиуса  $r_y$ , в которой лежат вектор скорости резания и вектор скорости относительного движения

$$a_{Tr} = \left\{ \begin{array}{cc|cc} n_{yT} & n_{zT} & n_{zT} & n_{xT} \\ 0 & n_{zr} & n_{zr} & n_{xr} \end{array} \middle| \begin{array}{cc|cc} n_{xT} & n_{yT} & n_{xr} & 0 \end{array} \right\}, \quad (2.9)$$

$$a_{xTr} = n_{yT}n_{zr}, \quad a_{zTr} = n_{zT}n_{xr} - n_{xT}n_{zr}, \quad a_{zTr} = -n_{yT}n_{xr}.$$

Уравнение цилиндра, проходящего через точку профиля режущей кромки

$$\left. \begin{aligned} x_0 &= -r_y \cos \zeta_{y0} \\ z_0 &= r_y \sin \zeta_{y0} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Уравнение плоскости, касательной к цилиндру в точке  $M_{1T}$

$$\left| \begin{array}{cc} x_0 - x_1 & z_0 - z_1 \\ \frac{\partial x}{\partial \zeta_{y0}} & \frac{\partial z}{\partial \zeta_{y0}} \end{array} \right| = 0 \quad (2.11)$$

Проекция вектора нормали на координатные оси

$$\left. \begin{aligned} n_{xr} &= \cos \zeta_{y0} \\ n_{zr} &= -\sin \zeta_{y0} \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Чтобы найти  $n_{x0}, n_{y0}, n_{z0}, n_{xT}, n_{yT}, n_{zT}$  запишем уравнение семейства винтовых поверхностей производящего червяка:

$$\left. \begin{aligned} x_{RL0} &= (r_{b0} \cos(v_{RLy0}) + u_{RLy0} \cos \gamma_{b0} \sin(v_{RLy0})), \\ y_{RL0} &= p_{zx0}(v_{RLy0}) - u_{RLy0} \sin \gamma_{b0}, \\ z_{RL0} &= r_{b0} \sin(v_{RLy0}) - u_{RLy0} \cos \gamma_{b0} \cos(v_{RLy0}). \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Координаты точек режущей кромки фрезы в системе координат производящего червяка:

$$\left. \begin{aligned} x_{RL_{\gamma0}} &= x_{RLx0} \cos \zeta_{RL\gamma0}, \\ y_{RL_{\gamma0}} &= y_{RLx0} + 0,5 p_{x0} \zeta_{RL\gamma0} / \pi, \\ z_{RL_{\gamma0}} &= -x_{RLx0} \sin \zeta_{RL\gamma0}. \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

Касательной плоскостью к винтовой производящей поверхности в точке  $M_0$  передней плоскости является плоскость определяющая положение секущей плоскости и плоскости проходящей через  $M_0$  и через отличную от нее точку  $M_1$  при стремлении  $M_1$  к  $M_0$ .

Уравнение поворота режущей кромки по винтовой линии

$$\left. \begin{aligned} x_{RL_{M_0}} &= x_{RL_{\gamma_0}} \cos \zeta_{00} + z_{RL_{\gamma_0}} \sin \zeta_{00}, \\ y_{RL_{M_0}} &= y_{RL_{\gamma_0}} + 0,5 p_{x_0} \zeta_{00} / \pi, \\ z_{RL_{M_0}} &= -x_{RL_{\gamma_0}} \sin \zeta_{00} + z_{RL_{\gamma_0}} \cos \zeta_{00}. \end{aligned} \right\}, \quad (2.15)$$

где  $\zeta_{00}$  - угол между радиус-векторами из начала координат к точке  $M_0$  и к точке  $M_1$  режущей кромки.

Для определения положения вектора скорости результирующего движения запишем уравнение касательной плоскости к производящей поверхности

$$\frac{x_{M_0} - x_{M_1}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial y_{M_0}}{\partial u} & \frac{\partial z_{M_0}}{\partial u} \\ \frac{\partial y_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} & \frac{\partial z_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} \end{vmatrix}} = \frac{y_{M_0} - y_{M_1}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial x_{M_0}}{\partial u} & \frac{\partial z_{M_0}}{\partial u} \\ \frac{\partial x_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} & \frac{\partial z_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} \end{vmatrix}} = \frac{z_{M_0} - z_{M_1}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial x_{M_0}}{\partial u} & \frac{\partial y_{M_0}}{\partial u} \\ \frac{\partial x_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} & \frac{\partial y_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} \end{vmatrix}}. \quad (2.16)$$

Тогда

$$\begin{aligned} n_{x_0} &= \frac{\frac{\partial y_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} \cdot \frac{\frac{\partial z_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} - \frac{\frac{\partial z_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} \cdot \frac{\frac{\partial y_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}}, \\ n_{y_0} &= \frac{\frac{\partial z_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} \cdot \frac{\frac{\partial x_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} - \frac{\frac{\partial x_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} \cdot \frac{\frac{\partial z_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}}, \\ n_{z_0} &= \frac{\frac{\partial x_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} \cdot \frac{\frac{\partial y_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} - \frac{\frac{\partial y_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}} \cdot \frac{\frac{\partial x_{M_0}}{\partial u}}{\frac{\partial \zeta_{00}}{\partial u}}. \end{aligned}$$

Частные производные

$$\begin{aligned} \frac{\partial x_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} &= -x_{RL_{M_0}} \sin \zeta_{00} + z_{RL_{M_0}} \cos \zeta_{00}, \quad \frac{\partial y_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} = p_{z_0}, \\ \frac{\partial z_{M_0}}{\partial \zeta_{00}} &= -x_{RL_{M_0}} \cos \zeta_{00} - z_{RL_{M_0}} \sin \zeta_{00}, \\ \frac{\partial x_{M_0}}{\partial u} &= -\sin(\nu_{RL_0} + \zeta_{\gamma_0} + \zeta_{00}) \cos \gamma_{b_0}, \quad \frac{\partial y_{M_0}}{\partial u} = -\sin \gamma_{b_0}, \end{aligned}$$

$$\frac{\partial z_{M_0}}{\partial u} = -\cos(\nu_{RL_0} + \zeta_{\gamma 0} + \zeta_{00}) \cos \gamma b_0.$$

Координаты режущих кромок производящего червяка в системе координат технологического червяка определим из уравнения

$$\left. \begin{aligned} x_{RL_T} &= x_{RL_{\gamma 0}} + a_x, \\ y_{RL_T} &= y_{RL_{\gamma 0}}, \\ z_{RL_T} &= z_{RL_{\gamma 0}} + a_z. \end{aligned} \right\} \quad (2.17)$$

Плоскостью касательной к винтовой производящей поверхности в точке передней плоскости  $M_{0T}$  называется плоскость являющаяся предельным положением секущей плоскости, проходящей через  $M_{0T}$  и через отличную от нее точку  $M_{1T}$  при стремлении  $M_{1T}$  к  $M_{0T}$ .

$$\left. \begin{aligned} x_{RL_{M_{0T}}} &= x_{RL_{\gamma 0}} \cos \zeta_{0T} + z_{RL_{\gamma 0}} \sin \zeta_{0T} + a_x \cos \zeta_{0T} + a_z \sin \zeta_{0T}, \\ y_{RL_{M_{0T}}} &= y_{RL_{\gamma 0}} + 0,5 p_{x0} \zeta_{0T} / \pi, \\ z_{RL_{M_{0T}}} &= -x_{RL_{\gamma 0}} \sin \zeta_{0T} + z_{RL_{\gamma 0}} \cos \zeta_{0T} - a_x \sin \zeta_{0T} + a_z \cos \zeta_{0T}, \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

где  $\zeta_{0T}$  - угол поворота координат режущей кромки из точки  $M_{0T}$  в точку  $M_{1T}$ .

Для определения положения вектора скорости результирующего движения запишем уравнение касательной плоскости к технологической поверхности

$$\frac{x_{M_{0T}} - x_{M_{1T}}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial y_{M_{0T}}}{\partial u} & \frac{\partial z_{M_{0T}}}{\partial u} \\ \frac{\partial y_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}} & \frac{\partial z_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}} \end{vmatrix}} = \frac{y_{M_{0T}} - y_{M_{1T}}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial x_{M_{0T}}}{\partial u} & \frac{\partial z_{M_{0T}}}{\partial u} \\ \frac{\partial x_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}} & \frac{\partial z_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}} \end{vmatrix}} = \frac{z_{M_{0T}} - z_{M_{1T}}}{\begin{vmatrix} \frac{\partial x_{M_{0T}}}{\partial u} & \frac{\partial y_{M_{0T}}}{\partial u} \\ \frac{\partial x_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}} & \frac{\partial y_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}} \end{vmatrix}}. \quad (2.19)$$

Проекция вектора нормали на координатные оси

$$n_{xT} = \frac{\partial y_{M_{0T}}}{\partial u} \cdot \frac{\partial z_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}} - \frac{\partial z_{M_{0T}}}{\partial u} \cdot \frac{\partial y_{M_{0T}}}{\partial \zeta_{0T}},$$

$$n_{yT} = \frac{\partial z M_{0T}}{\partial u} \cdot \frac{\partial x M_{0T}}{\partial \zeta_{0T}} - \frac{\partial x M_{0T}}{\partial u} \cdot \frac{\partial z M_{0T}}{\partial \zeta_{0T}},$$

$$n_{zT} = \frac{\partial x M_{0T}}{\partial u} \cdot \frac{\partial y M_{0T}}{\partial \zeta_{0T}} - \frac{\partial y M_{0T}}{\partial u} \cdot \frac{\partial x M_{0T}}{\partial \zeta_{0T}}.$$

Частные производные

$$\frac{\partial x M_{0T}}{\partial \zeta_0} = -x_{RL_{T0}} \sin \zeta_{0T} + z_{RL_{T0}} \cos \zeta_{0T} - a_x \sin \zeta_{0T} + a_z \cos \zeta_{0T},$$

$$\frac{\partial y M_{0T}}{\partial \zeta_0} = p_{zx0},$$

$$\frac{\partial z M_{0T}}{\partial \zeta_0} = -x_{RL_{T0}} \cos \zeta_{0T} - z_{RL_{T0}} \sin \zeta_{0T} - a_x \cos \zeta_{0T} + a_z \sin \zeta_{0T},$$

$$\frac{\partial x M_{0T}}{\partial u} = -\sin(v_{RL_0} + \zeta_{\gamma_0} + \zeta_{0T}) \cos \gamma_{b_0}, \quad \frac{\partial y M_{0T}}{\partial u} = -\sin \gamma_{b_0},$$

$$\frac{\partial z M_{0T}}{\partial u} = -\cos(v_{RL_0} + \zeta_{\gamma_0} + \zeta_{0T}) \cos \gamma_{b_0}.$$

Результаты расчета представлены в таблице 2.7. Как известно, уменьшение заднего угла повышает точность фрезы; но с учетом полученных данных можно увидеть, что после каждой переточки задний кинематический угол увеличивается.

Таблица 2.7

Изменение кинематических задних углов при перетачивании фрезы, град

Номер точки	Ширина головки рейки после затачивания инструмента, мм							
	19		18		17		16	
	Задний кинематический угол, град							
1	5,14	-5,20	5,14	-5,19	5,15	-5,19	5,16	-5,18
2	5,06	-5,12	5,06	-5,12	5,07	-5,11	5,08	-5,10
3	4,98	-5,05	4,99	-5,04	4,99	-5,03	5,00	-5,03
4	4,90	-4,97	4,91	-4,97	4,92	-4,96	4,92	-4,95
5	4,83	-4,90	4,84	-4,90	4,84	-4,89	4,85	-4,88
6	4,76	-4,83	4,77	-4,83	4,77	-4,82	4,78	-4,81
7	4,69	-4,77	4,70	-4,76	4,70	-4,75	4,71	-4,75
8	4,62	-4,70	4,63	-4,69	4,64	-4,69	4,64	-4,68
9	4,56	-4,63	4,56	-4,63	4,57	-4,62	4,58	-4,62
10	4,49	-4,57	4,50	-4,57	4,51	-4,56	4,51	-4,56

	15		14		13		12	
1	5,16	-5,17	5,17	5,16	-5,16	5,17	5,16	-5,16
2	5,08	-5,09	5,09	5,08	-5,08	5,09	5,08	-5,08
3	5,00	-5,02	5,01	5,01	-5,01	5,01	5,01	-5,01
4	4,93	-4,95	4,93	4,94	-4,94	4,93	4,94	-4,94
5	4,85	-4,88	4,86	4,87	-4,87	4,86	4,87	-4,87
6	4,78	-4,81	4,79	4,80	-4,80	4,79	4,80	-4,80
7	4,71	-4,74	4,72	4,73	-4,73	4,72	4,73	-4,73
8	4,65	-4,67	4,65	4,67	-4,67	4,65	4,67	-4,67
9	4,58	-4,61	4,59	4,61	-4,61	4,59	4,61	-4,61
10	4,52	-4,55	4,52	4,54	-4,54	4,52	4,54	-4,54

Изменение заднего кинематического угла представлено на рисунке 2.9.

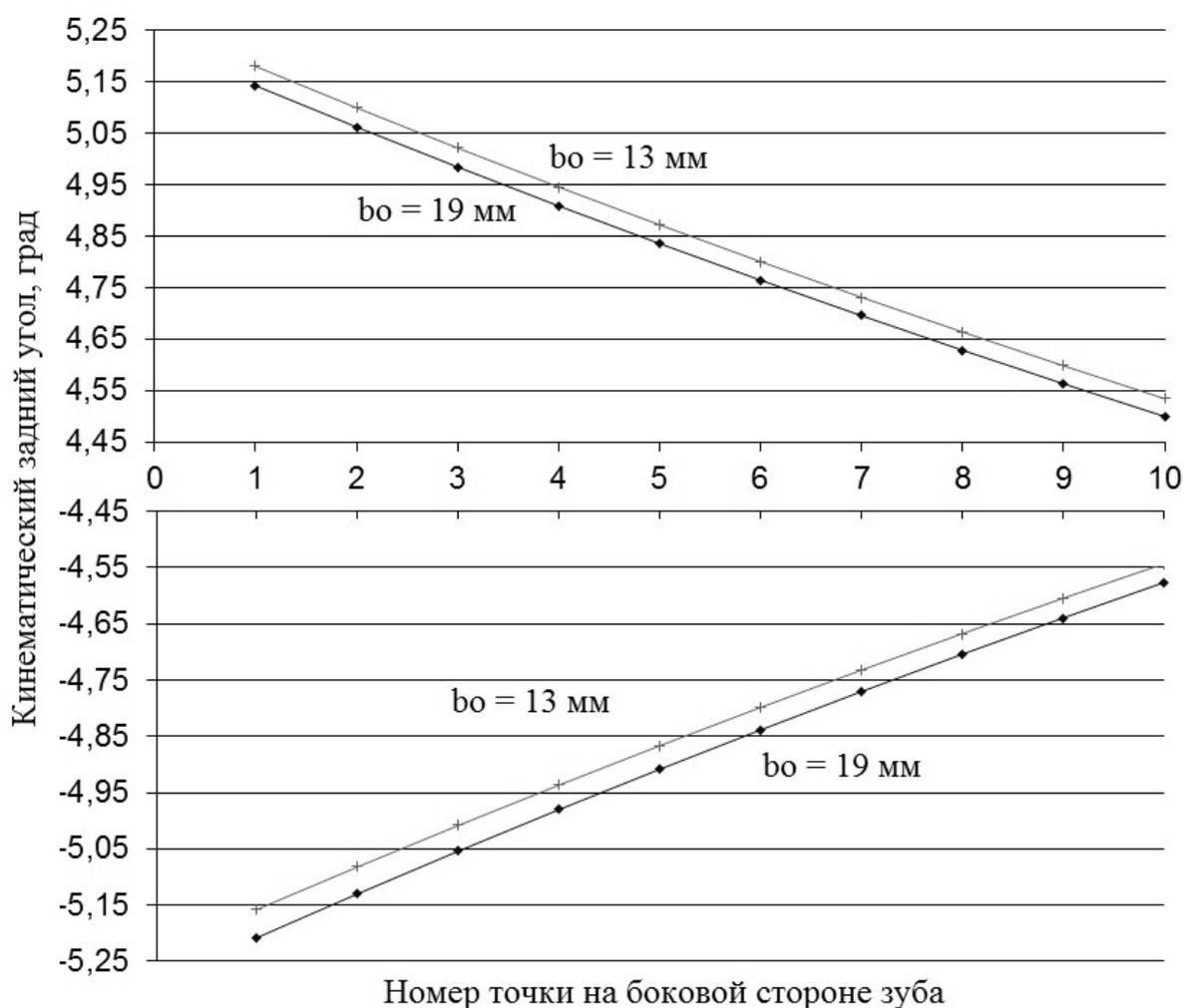


Рис. 2.9. Изменение задних кинематических углов на боковых сторонах зуба

Вследствие переточек фрезы по передней поверхности на 6 мм задние кинематические углы на боковых сторонах изменились не более чем на 2%.

## Выводы по 2 разделу

1. Установлено, что увеличение продольной подачи  $S_0$  уменьшает количество резов, приходящихся на впадину. Например, для колеса с числом зубьев  $z_1 = 112$  и шириной зубчатого венца  $55 \text{ мм}$  при  $S_0 = 1 \text{ мм/об}$  количество резов 626, а при  $S_0 = 4 \text{ мм/об}$  - 176.

2. Дифференциальный подход к рассмотрению процесса вырезания впадины, как элемента изделия, определил совокупность параметров, необходимых для дальнейшего исследования и учета их влияния на силу резания. К этим параметрам относятся: модуль, продольная подача, передний угол, число зубьев нарезаемого колеса.

3. Исследование влияния стачивания реек фрезы по передней поверхности показало несущественное изменение задних кинематических углов резания. Так при стачивании  $6 \text{ мм}$  с реек, задние кинематические углы резания на боковых сторонах увеличиваются не более чем на 2% от исходного значения, в связи с этим во время проведения серии экспериментальных исследований этими изменениями можно пренебречь.

### III ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ СБОРНЫМИ ЧЕРВЯЧНЫМИ ФРЕЗАМИ

#### 3.1 Планирование эксперимента

Экспериментальное исследование процесса зубофрезерования направлено на определение:

- составляющих силы резания при обработке сборными червячными фрезами прямозубых цилиндрических колес методом обкатки;
- точности обработанных образцов, т. е. шероховатости, волнистости и огранки;
- конструктивных параметров экспериментальной фрезы;
- рациональных режимов резания.

За основу взят эксперимент, в общем случае описываемый зависимостью вида [7, 15]:

$$Y = f(x) + e(x),$$

где  $f(x)$  - отклик функции,  $e(x)$  - ошибки измерительной системы.

При проведении эксперимента учитываются параметры (табл. 3.1), определяющие процесс зубофрезерования:  $m$ ,  $S_0, \gamma_a, z_1$ , СОЖ В качестве смазочно-охлаждающей жидкости в рассматриваемой серии экспериментов использован сульфофрезол (ГОСТ 122-84).

Таблица 3.1

Граничные значения технологических и конструктивных параметров

Уровень	Параметры							
	Конструктивные						Технологические	
	$d_a, мм$	$z_1$	$z_{10}$	$\alpha_a, град$	$\gamma_a, град$	$z_0$	$V, м/мин$	$S_0, мм/об$
Нижний	90	80	1	13	0	12	15	0,8
Верхний	110,4	112			5		4	

Искомыми являются величины составляющих силы резания  $P_x$  и  $P_z$ . Тогда зависимость, определяющая максимальную величину составляющей силы резания при зубофрезеровании сборными червячными фрезами, примет вид:

$$P_{xz} = C_{xz} \left( S_0^{\alpha_1} \cdot (C + \gamma_a)^{\alpha_2} \cdot z_1^{\alpha_3} \cdot m^{\alpha_4} \cdot K_{H\beta}^{\alpha_5} \cdot K_s \right). \quad (3.1)$$

В соответствии с теорией планирования эксперимента [7] каждый фактор варьируется на двух уровнях – «-1» и «+1». При этом реализуются комбинации минимальных и максимальных значений факторов.

Диапазоны изменения скорости резания и подачи определены моделью станка и настройкой его гитар. Так, для универсального зубофрезерного станка – полуавтомата 5К32А значения технологических параметров представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

#### Режимы резания

Диаметр фрезы. <i>мм</i>	Выбор скоростей резания			Выбор подачи на оборот заготовки	
	<i>V, мм/мин</i>	<i>n, об/мин</i>	Сменные шестерни	<i>S<sub>0</sub>, мм/об</i>	Сменные шестерни
$d_a = 90 - 110,4$	15	50	20/67	0,8	28/68
	19	63	23/64	1	32/64
	24	80	27/60	1,7	43/53
	29	100	31/56	2	48/48
	38	125	35/51	2,5	53/43
	50	160	41/46	4	64/32

Режимы зубонарезания установлены так, чтобы полученные результаты можно было рекомендовать для практического применения на машиностроительных предприятиях.

Подготовка эксперимента включает:

- проектирование и изготовление инструмента;
- разработку конструкции и отладку экспериментальной установки;
- исследование составляющих силы резания в зависимости от режимов резания;

- теоретическое исследование погрешностей и шероховатости поверхности зуба при различных режимах обработки;

- выявление влияния режимов обработки на стойкость инструмента между переточками.

Ориентировочное время, затрачиваемое на проведение эксперимента, определено по формуле [7]:

$$t = k \sum_{i=1}^m t_i p_i, \quad (3.2)$$

где  $k$  – количество серий испытаний;  $p_i$  – повторяемость каждого опыта;  $m$  – количество различных опытов;  $t_i$  – время проведения одного опыта.

### 3.2 Конструкция экспериментальной сборной червячной фрезы

Основные требования к конструкции фрезы:

1) надежность закрепления реек в корпусе за счет назначения и выполнения соответствующих допусков на базовые и сопрягаемые поверхности пазов и реек, на торцовые поверхности корпуса и реек, а также зажимные элементы;

2) точность расположения режущих кромок червячной фрезы на производящей винтовой поверхности за счет выполнения допусков на базовые поверхности корпуса фрезы и реек и сборку;

3) многократное использование корпуса и крышек фрезы.

За основу экспериментальной конструкции взята фреза класса А [27], позволяющая устанавливать зубчатые рейки в диапазоне модулей от  $m = 2\text{ мм}$  до  $4,5\text{ мм}$  и имитировать обработку заготовок. При этом корпус можно использовать как технологический и как рабочий, что обеспечивается расчетом геометрических параметров реек, с одинаковым смещением пазов в корпусе относительно осевой плоскости.

Смещение оси паза  $s$  рассчитано по зависимости:

$$2c \cdot \cos(\arcsin \left( \frac{b_o + c + \frac{b_{oc}}{2}}{r_{a0}} \right) - \alpha_a) - r_{a0} \cdot \sin(\alpha_a) = 0, \quad (3.3)$$

где  $b_o$  – ширина головки рейки,  $r_{a0}$  – радиус вершин зубьев,  $b_{oc}$  – ширина паза для рейки,  $\alpha_a$  – задний угол при вершине.

Например, смещению оси паза  $c = 6 \text{ мм}$  соответствует  $m = 4,5 \text{ мм}$ ,  $b_o = 20 \text{ мм}$ ,  $b_{oc} = 10,75 \text{ мм}$ ,  $\alpha_a = 13^\circ$  или  $m = 2,75 \text{ мм}$ ,  $b_o = 20 \text{ мм}$ ,  $b_{oc} = 10,75 \text{ мм}$ ,  $\alpha_a = 15^\circ$ . На основе полученных данных спроектирован корпус (рис. 3.1) и сборная червячная фреза (рис. 3.2).

Аналогичные расчеты геометрических параметров реек для фрез с модулями: 2; 2,5; 2,75; 3; 4; 4,25; 4,5 мм показывают, что можно подобрать такое смещение паза, при котором возможно обеспечить размещение реек требуемых модулей в одном корпусе. Однако, параметры задних поверхностей инструментов будут различны.

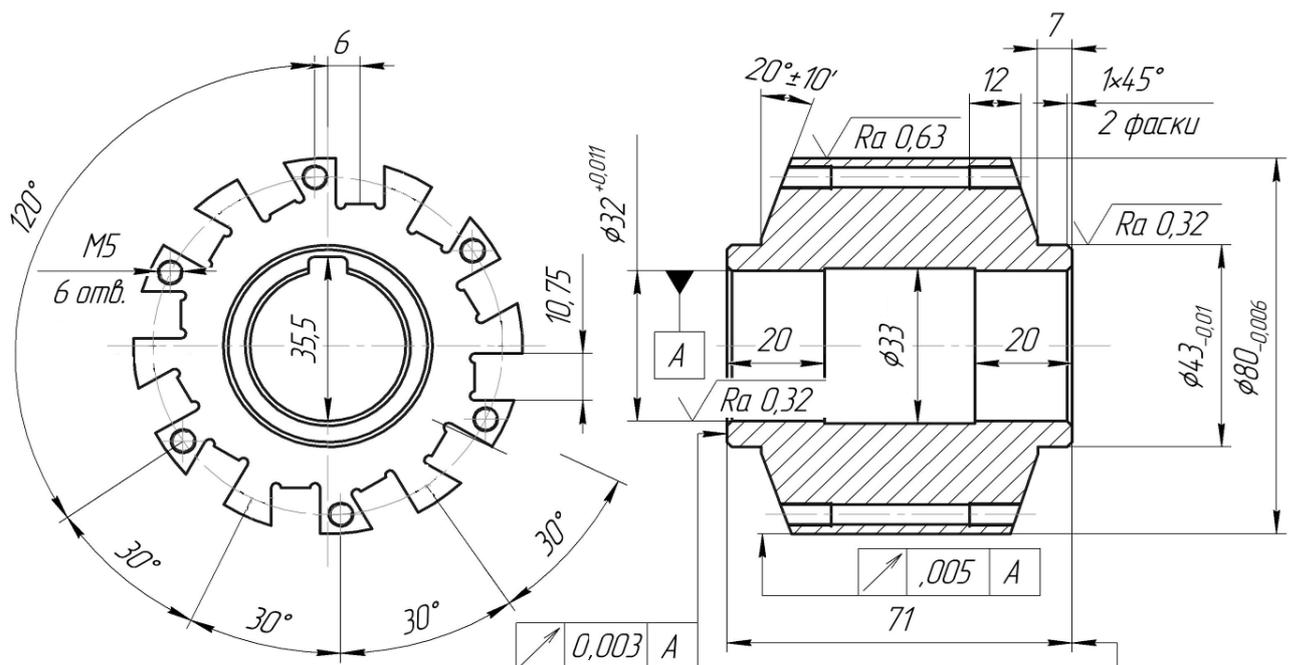
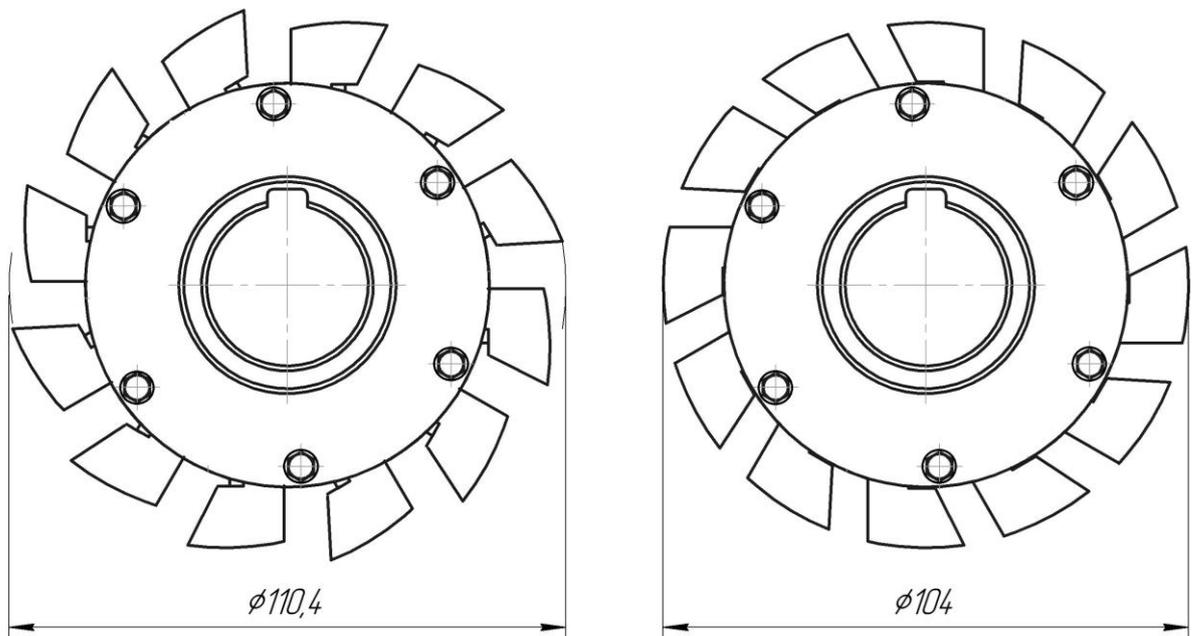
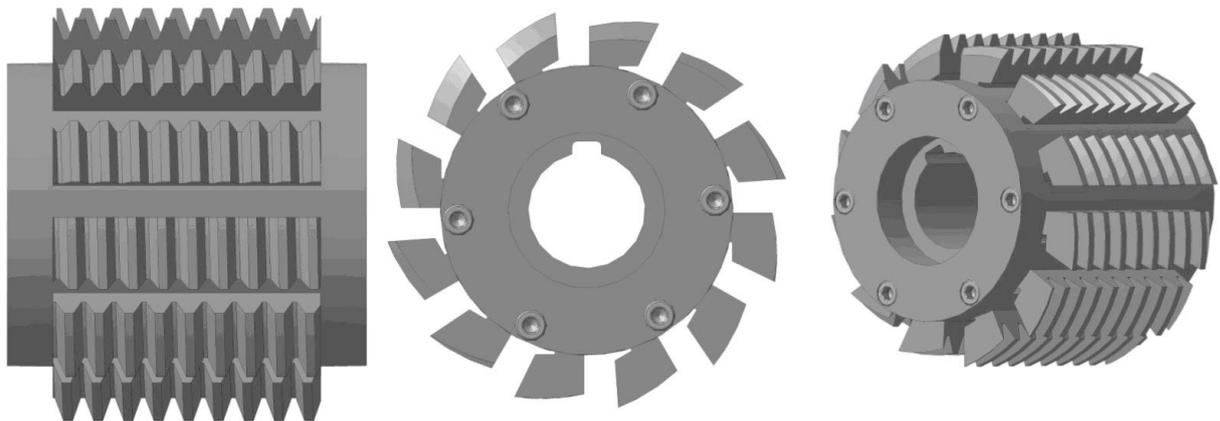


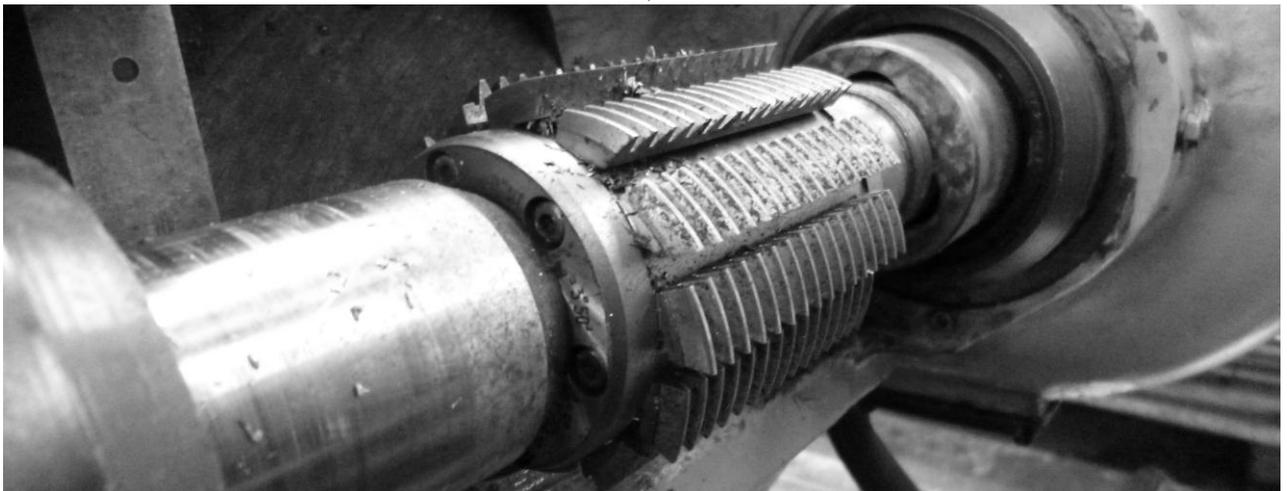
Рис. 3.1. Корпус фрезы



а)



б)



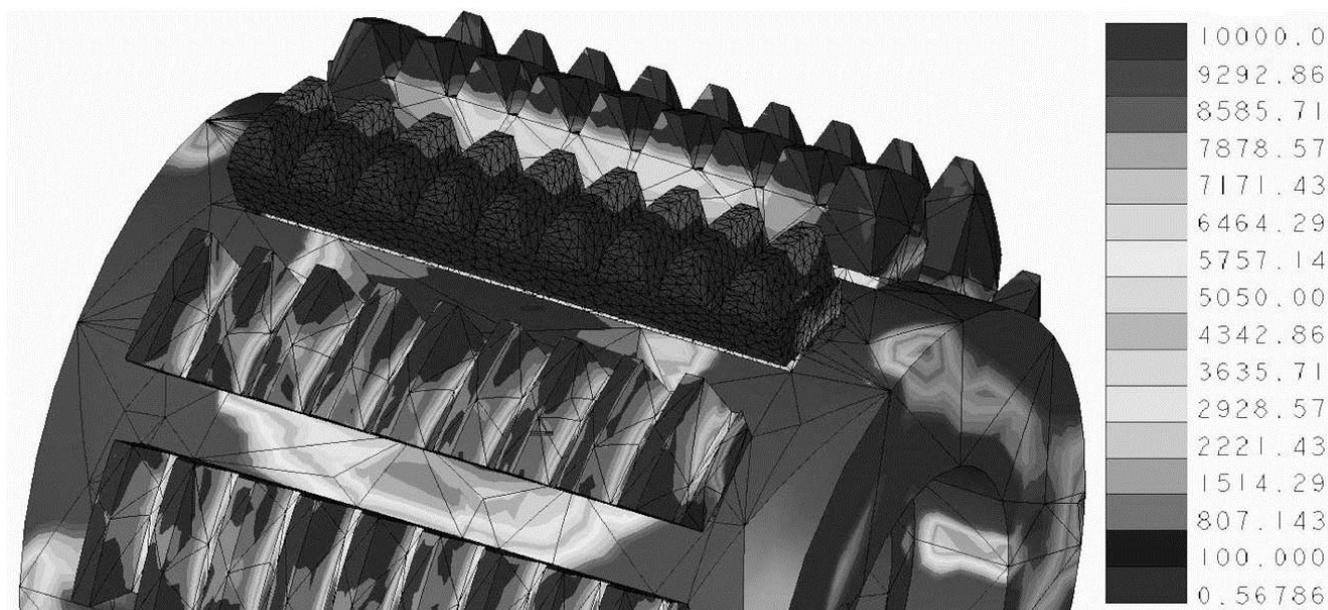
в)

Рис. 3.2. Сборная червячная фреза

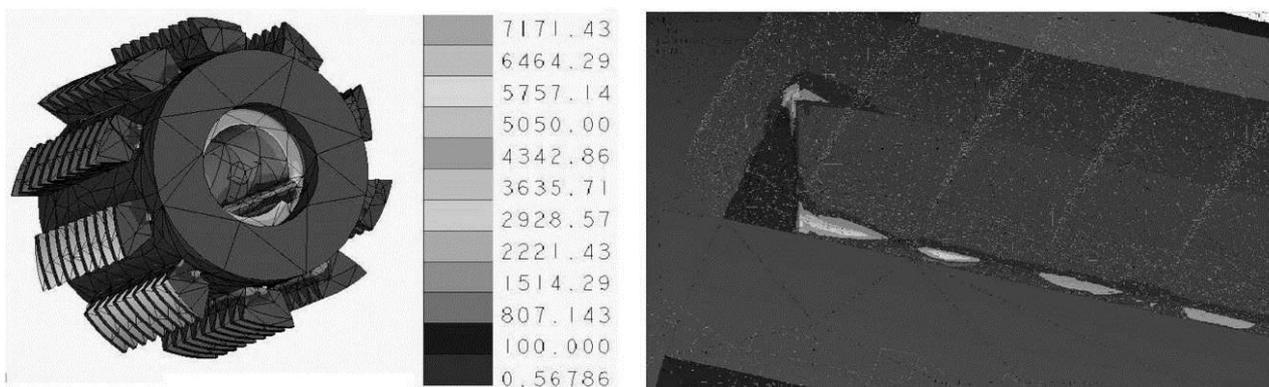
а – эскиз фрезы; б - 3D-модель сборной червячной фрезы; в – фреза на станке

На основе 3D – модели (рис. 3.2, б) сборной червячной фрезы и общемашиностроительных нормативов режимов резания, на которых планируется испытать инструмент, проведено компьютерное прогнозирование поведения инструмента и его режущих свойств в Creo Simulate (рис.3.3). Описание работы программы и основные программные модули см. пункт 4.3.

Конструкция инструмента по [27] имеет значительный запас прочности, поэтому для экспериментальной фрезы уменьшен диаметр корпуса до 80 мм, увеличена ширина пазов для зубчатых реек и уменьшена длина корпуса.



а)



б)

в)

Рис. 3.3. Нагрузки, испытываемые инструментом,  $H$ :

а – при динамических испытаниях; б - при проверке зубчатых реек на разрушение;

в - при проверке на прочность закрепления реек

Проверка фрез на прочность и целостность осуществлялась на различных нагрузках. Критической величиной была 100 Гц. При производственной эксплуатации нагрузки, испытываемые инструментом значительно ниже. Учитывая это, можно сделать вывод о том, что экспериментальная фреза изготовлена с достаточным запасом прочности. Разрушения происходили в местах переходов основания реек к режущим зубьям.

Для изготовления экспериментальной фрезы использована оправка, конструктивной особенностью которой является наличие двух рабочих цилиндрических поверхностей: для предварительного прорезания и шлифования зубьев и для контроля при сборке фрезы (рис. 3.4). Это позволило уменьшить погрешности установки и базирования.

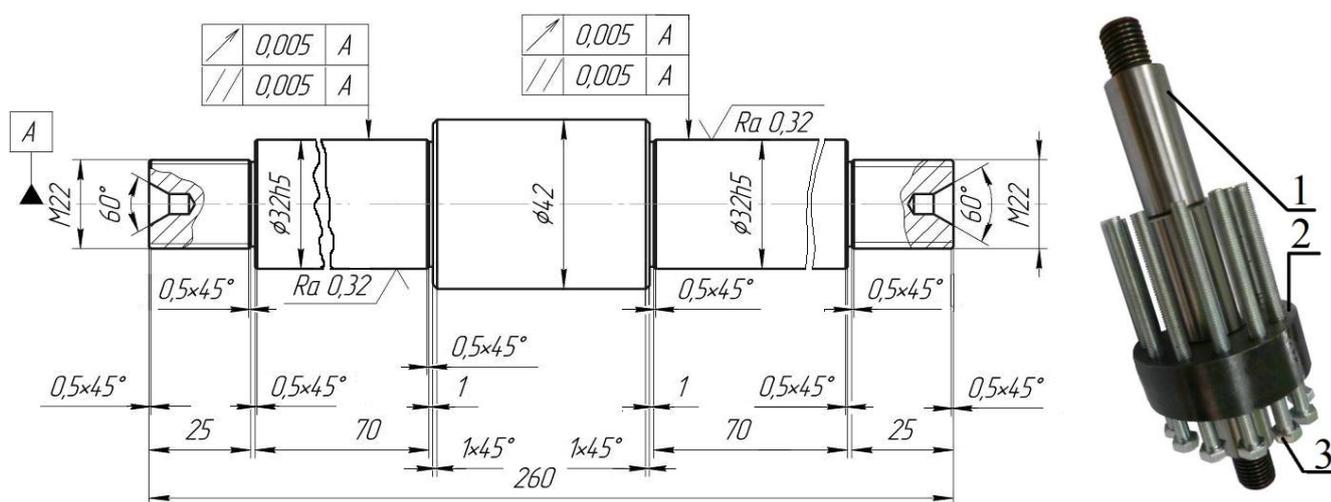


Рис. 3.4. Оправка

1 – оправка; 2 – диск; 3 – регулировочные винты

Для регулирования и контроля положений зубчатых реек при сборке фрезы на оправку 1 (см. рис. 3.4) установлен диск 2 диаметром Ø80 мм и шириной 30 мм из закаленной до 55 HRC стали 40X, с 12 резьбовыми отверстиями для винтов 3, регулирующих осевое положение реек.

Зубчатые рейки изготовлены из быстрорежущей стали (таблица 3.3). В исследованиях - сталь P6M5. Заготовка - горячекатаный пруток Ø 54 мм.

Таблица 3.3

Быстрорежущие стали по ГОСТ 19265-73 для изготовления зубчатых реек

	Обрабатываемые стали
P9	конструкционные
P18	углеродистые, легированных и конструкционные
P6M5	углеродистые, легированные и конструкционные при повышенных ударных нагрузках
P6M5K5	легированных и коррозионностойкие

Согласно технологическому процессу изготовления компонентов сборной червячной фрезы технологическая себестоимость составила 20863 руб. (табл. 3.4).

Таблица 3.4

Технологическая себестоимость фрезы

Статьи расходов	Сумма, руб.
Материалы	846,18
Заработная плата	14243,71 (140 руб. · 102 н/часа)
Отчисления на социальные нужды	4273,11
Прочие расходы	1500,00
ИТОГО:	20863,00

На операциях чернового точения и растачивания корпуса фрезы осуществлено резцами фирмы Iscar на токарном станке с ЧПУ Top-Turn CNC-S16(C).

Сверлильные, фрезерные операции выполнены на вертикально-фрезерном многоцелевом станке VMC650E. Заготовка закреплялась в трехкулачковом патроне поворотного стола Nikken.

Шлифование торцов крышек, реек, клиньев и колец осуществлено на плоскошлифовальном станке мод. 3E71.

Термообработка (закалка) корпуса фрезы, крышек и реек из быстрорежущей стали, а также формирование шпоночного паза и шлифование посадочного отверстия выполнены сторонними предприятиями.

### 3.3 Контроль геометрических размеров элементов сборной червячной фрезы

Обработка профиля зубчатых реек осуществляется в технологическом положении в корпусе фрезы. При их перестановке в рабочее положение обеспечивается требуемая точность. Рейки, изготовленные с высокой точностью геометрических размеров, базируются в корпусе фрезы по торцам и пазам, однако их биение не должно превышать 6 мкм (аналогично биению буртиков для фрез класса А по ГОСТ 9324-80). Поэтому необходим контроль реек для обеспечения класса точности фрезы, а, следовательно, и точности обработанных колес, который осуществлялся на универсальном микроскопе УИМ-21 (табл. 3.5).

Для измерения осевого шага рейка устанавливается и фиксируется на столике микроскопа параллельно визирным линиям. Измерения производятся в трех точках: на вершине зуба, на средней линии зуба и во впадине. Зафиксировав тормозным винтом вертикальное положение стола, с помощью накатного кольца, перемещая стол горизонтально от точки к точке, записывают ее координаты. Разность координат определяет осевой шаг. Контроль толщины зуба - аналогичен

Таблица 3.5

#### Отклонения зубчатых реек

Координаты точек		Толщина зуба, мм	Отклонение толщины зуба от теоретического значения, мм	Практические значения осевого шага реек, мм	Разница между теоретическими и практическими значениями, мм
левой стороны зуба	правой стороны зуба				
23,1199	27,0470	3,927	0,001	7,854	0,002
30,9795	34,9120	3,932	0,004	7,865	-0,0008
38,8399	42,7680	3,928	0,000	7,856	0,0004
46,6946	50,6220	3,927	0,000	7,854	0,001
54,5538	58,4810	3,927	0,001	7,854	0,002
62,5535	66,4810	3,927	0,001	7,854	0,002
70,4094	74,3379	3,928	0,000	7,856	-0,0003
78,2665	82,1960	3,929	0,001	7,859	0,002
86,1237	90,0506	3,926	0,001	7,853	-0,002

Анализ таблицы показывает, что отклонения толщины зуба рейки фрезы отличаются на 4 мкм от теоретического, а погрешность осевого шага на 5 мкм.

Следующей операцией является контроль смещения базовых торцов зубчатых реек по витку фрезы, предварительно обработанных на операции резьбошлифования (рис. 3.5). Для этого первую рейку промаркированного комплекта следует закрепить на столе микроскопа УИМ - 21 без возможности смещения. Торцевой зубчатой рейки при этом является базовым. Далее, по зубчатой поверхности закрепленной рейки последовательно базируем промаркированные рейки комплекта, с фиксацией размера от торца базовой рейки.

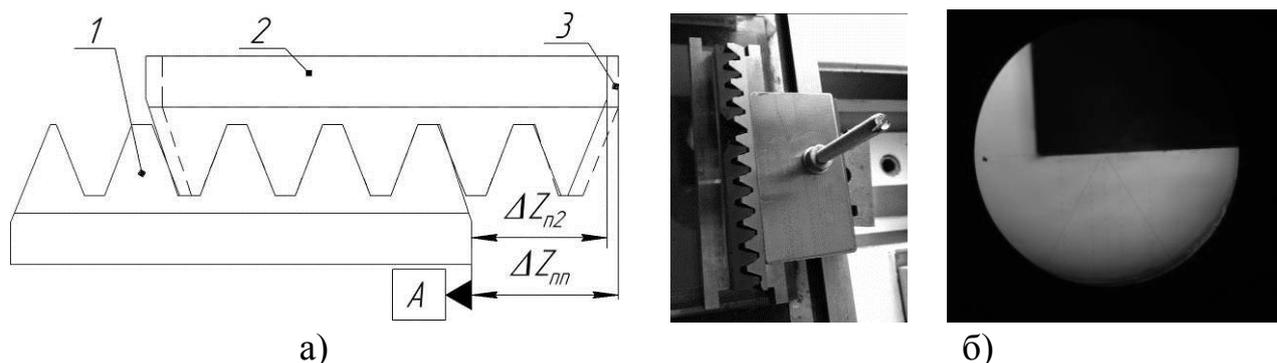


Рис. 3.5. Контроль базовых торцов зубчатых реек сборной червячной фрезы:

- а – схема контроля; б – общий вид: 1 – базовая рейка;  
2 – вторая рейка комплекта; 3 –  $n$ -ая рейка комплекта

Таблица 3.6

Координаты торцов зубчатых реек

Номер рейки	$\Delta_{\text{Теор}}$	Координаты торцов	$\Delta_{\text{Пр}}$	$\Delta$
2	0	13,6240	0	0
3	0,6545	14,2782	0,654	-0,0003
4	1,309	14,9250	1,303	-0,006
5	1,9635	15,5790	1,958	-0,006
6	2,618	16,2368	2,612	-0,005
7	3,2725	16,8912	3,267	-0,005
8	3,927	17,5457	3,921	-0,005
9	4,5815	18,1967	4,575	-0,006
10	5,236	18,8567	5,232	-0,003
11	5,8905	19,5090	5,885	-0,005
12	6,545	20,1635	6,539	-0,005
1	7,1995	20,8195	7,1925	-0,006

Описанный контроль винтовой поверхности является косвенным и позволяет определить комплексную погрешность реек (табл. 3.6), устраняемую при сборке фрезы.

Смещение базовых торцов:

$$\Delta_{\text{Теор}} = p_{ox} / z_k, \quad (3.4)$$

где  $z_k$  - число реек в комплекте,  $p_{ox}$  - осевой шаг зубчатой рейки.

Смещение реек:

$$\Delta_{\text{Пр}} = \Delta z_{nn} - \Delta z_{n2}, \quad (3.5)$$

где  $\Delta z_{n2}$  - смещение базового торца первой контролируемой рейки,  $\Delta z_{nn}$  - смещение базового торца  $n$ -ой контролируемой рейки

Отклонение смещения базового торца:

$$\Delta = \Delta_{\text{Теор}} - \Delta_{\text{Пр}}, \quad (3.6)$$

Разница между расчетными и полученными размерами не превысила 6 мкм.

Отклонения пазов для реек в корпусе фрезы от соосности, параллельности и перпендикулярности контролировались сканированием поверхности на КИМ «Master3DGage» (рис. 3.6), с дискретностью измерения до 2 мкм по 6-ти осям.

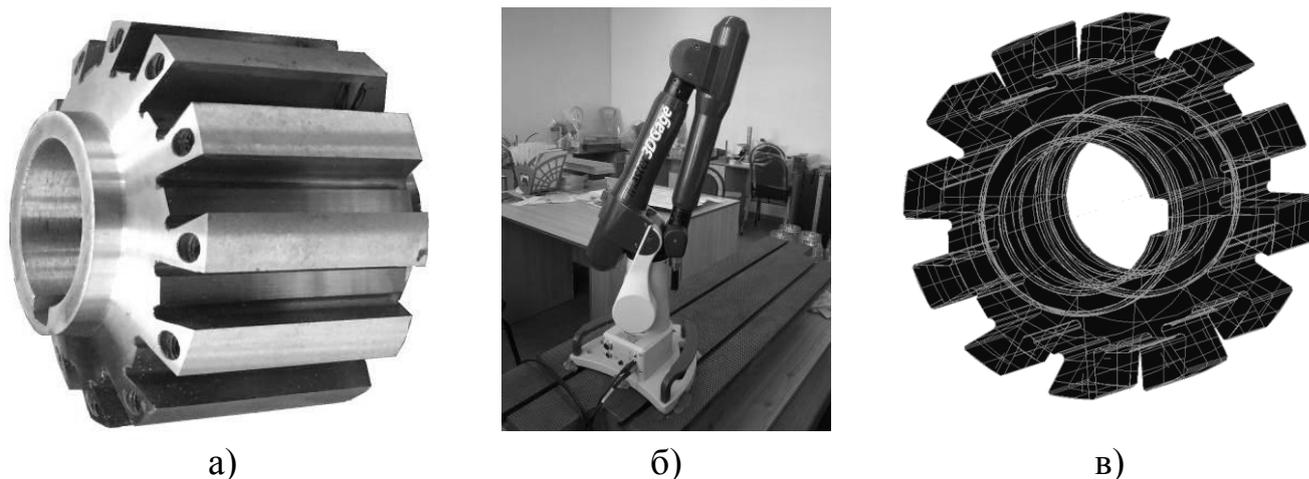


Рис. 3.6. Контроль геометрической точности корпуса фрезы:

а – корпус; б – внешний вид КИМ «Master3DGage»;

в – модель корпуса, построенная после измерения на КИМ

Корпус установлен торцом на гранитную плиту и закреплен при помощи высокомолекулярного полиэтилена. Шаг измерений 2 мкм. Отчеты об измерениях генерируются системой автоматически и представлены в виде файла формата «.EMCX» или «.MCX» (табл. 3.7). Измерения произведены в ручном и в автоматическом режимах. В ручном режиме – джойстиком подводя щуп к детали, отметив точку, перемещаем щуп к детали на малой скорости. После соприкосновения с деталью производится автоматическая остановка движения щупа контрольно-измерительной машины и фиксация координаты. Затем щуп перемещается к следующей точке. Все координаты точек фиксируются компьютером. Затем по ним строится 3D – модель.

Таблица 3.7

Геометрические отклонения параметров корпуса фрезы

Номер паза	Отклонение от параллельности дна паза, мм	Отклонение от параллельности левой стенки паза, мм	Отклонение от параллельности правой стенки паза, мм	Диаметр посадочного отверстия, мм	Радиальное биение корпуса, мм
1	0,009	0,005	0,005	Ø31,998	0,01
2	0,007	0,005	0,005		
3	0,007	0,005	0,005		
4	0,009	0,005	0,006		
5	0,009	0,006	0,006		
6	0,009	0,006	0,005		
7	0,006	0,005	0,004		
8	0,009	0,005	0,004		
9	0,007	0,004	0,004		
10	0,008	0,005	0,005		
11	0,007	0,005	0,006		
12	0,008	0,006	0,006		

Для программирования измерений, проводимых КИМ в автоматическом режиме, в компьютер загружается 3D-модель корпуса фрезы, выполненная в CAD/CAM системе, например в «Mastercam Design» или «КОМПАС – 3D», в одном из форматов «.IGES», «.MCX» или «.SLDPRT». После указания поверхности,

на которой необходимо провести измерения, компьютер определит оптимальную траекторию движения.

Результат комплексных измерений собранного инструмента показал, что все элементы червячной фрезы изготовлены с точностью, позволяющей собрать инструмент класса А.

### 3.4 Исследовательский комплекс

Требования к экспериментальным установкам для исследования процесса зубофрезерования включают: обеспечение точности и стабильности показаний, высокую жесткость и чувствительность, малую инерционность, большой диапазон измерений. Погрешность определения сил резания при зубофрезеровании не должна превышать 15% [51]. Общий вид схемы представлен на рисунке 3.7.



Рис. 3.7. Структурная схема

Установка смонтирована на зубофрезерном станке мод 5К32А (рис. 3.8). Тензорезисторные полумосты динамометра УДМ - 1200 соединены таким образом, чтобы сигнал измерительной схемы был пропорционален алгебраической сумме деформаций всех верхних и нижних датчиков, но при этом показания динамометра не зависят от того, в какой точке, закрепленной в нем заготовки, приложена измеряемая сила резания. Для передачи слабых электрических сигналов с тензорезисторных полумостов динамометра, к регистрирующей и анализирующей аппаратуре, а также для подключения питания, использован токосъемный узел и кольцевые переходники (рис. 3.9, б).

Посадочная цилиндрическая поверхность оправки позволяет устанавливать четыре токосъемных кольца в сборе с изоляторами, предназначенными для

передачи сигнала с динамометра: два кольца для подвода тока и два кольца для снятия тока. Провода, идущие от тензорезисторных полумостов к кольцам, размещены в канавке выполненной на цилиндрической поверхности оправки (рис. 3.9, а). Основное требование к токосъемному узлу - обеспечение низкого переходного сопротивления за счет подбора контактирующих материалов токосъемного кольца и щетки.

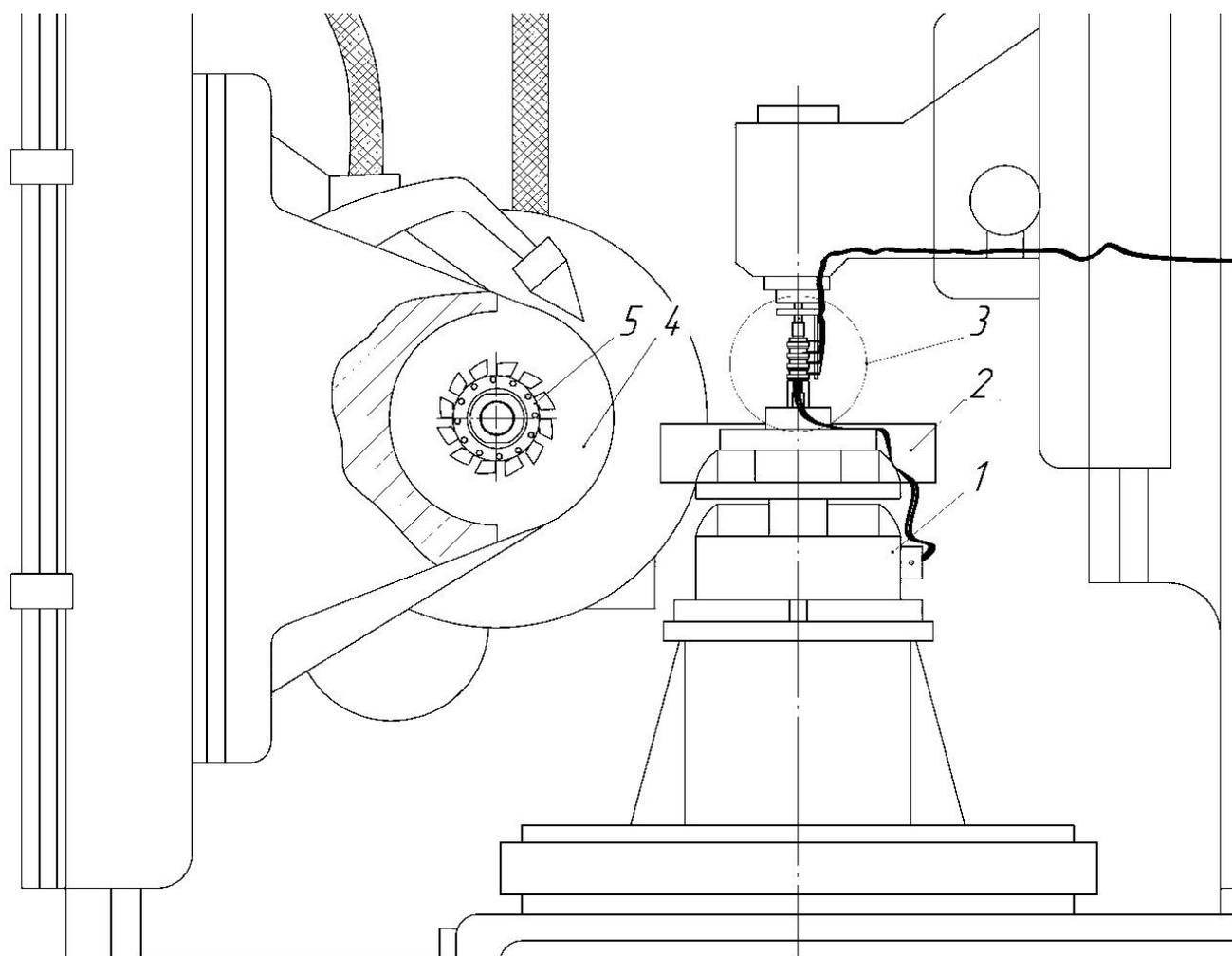


Рис. 3.8. Установка для измерения составляющих силы резания:

1 – универсальный динамометр УДМ 1200, 2 – заготовка, 3- токосъемный узел,  
4 –зубофрезерный станок мод. 5К32А, 5 – фреза

Характеристикой материала токосъемного кольца переходника является электрическая проводимость. В таблице 3.8 приведен перечень основных материалов для проводников.

Удельное сопротивление проводников кольцевых переходников, Ом·м

Al = 0,026	Ir = 0,054	Mg = 0,05	Pt = 0,098
W = 0,055	Cd = 0,074	Ni = 0,068	Rh = 0,043
Fe = 0,097	Co = 0,064	Sn = 0,113	Ag = 0,015
Au = 0,0225	Cu = 0,017	Pd = 0,108	Pb = 0,19

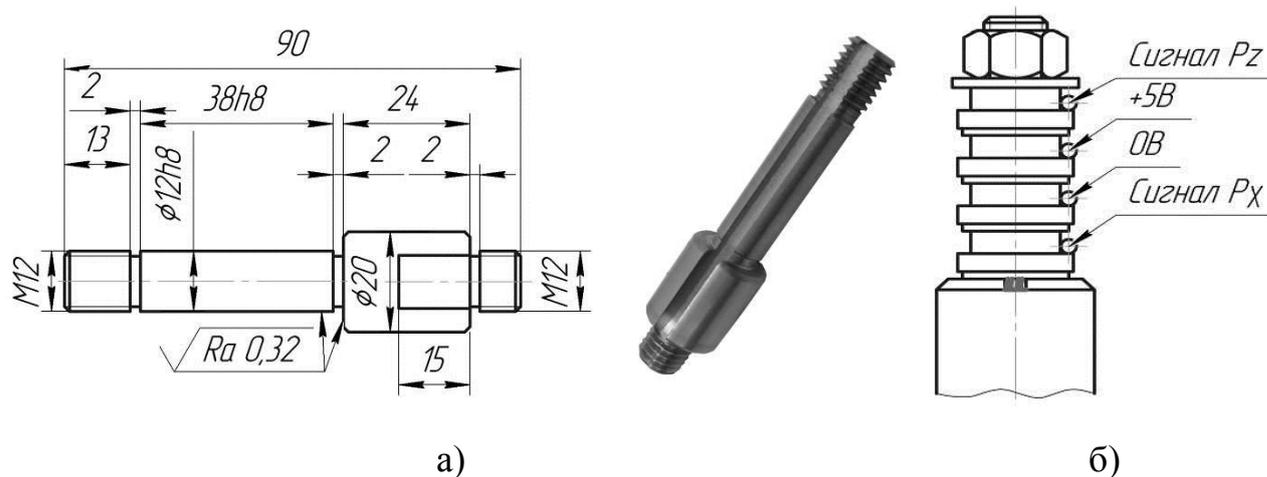


Рис. 3.9. Оправка токосъемного узла:

а – конструкция; б – схема подключения узла к осциллографу и блоку питания

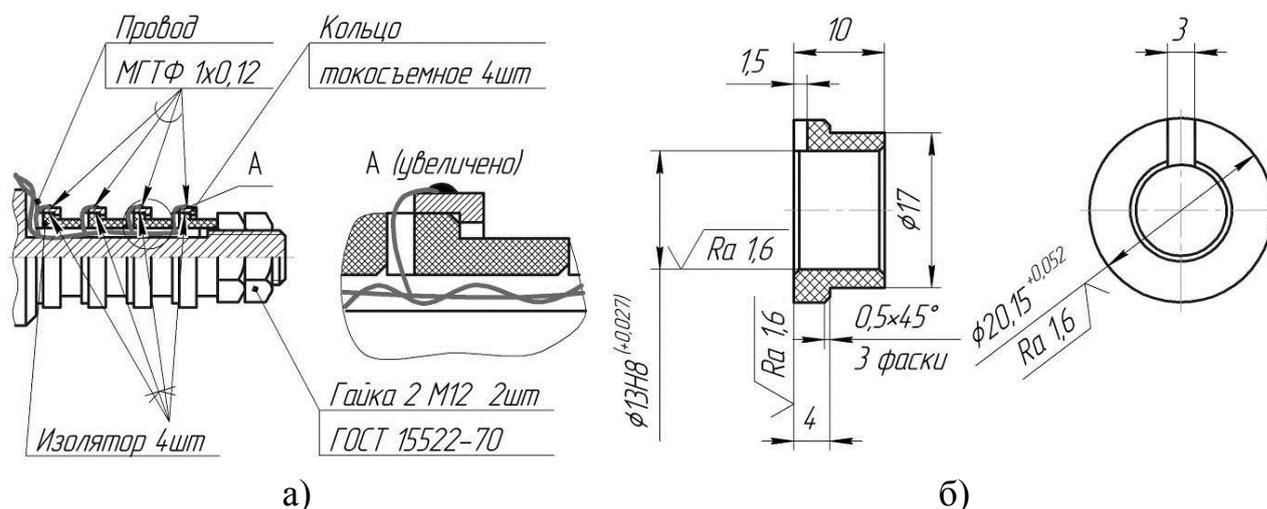


Рис. 3.10. Токосъемный узел:

а – конструкция токосъемного узла; б – изолятор

В кольцевом переходнике использованы серебряные кольца. Щетки из сплава ПДИ-18. Так как контактные явления зависят не только от материалов

контактной пары и силы прижима щетки к кольцу, но и от скорости скольжения, поэтому диаметр кольцевого переходника сделан минимально возможным.

Ответственной деталью токосъемного узла является изолятор из диэлектрического материала в виде втулки с буртиками [50]. Изоляторы изготовлены так, чтобы токосъемное кольцо устанавливалось на него с небольшим натягом. Торцевое биение кольца в сборе с изолятором не превышает 0,2 мм, а радиальное – 0,15 мм. Изоляторы обеспечивают электрическую прочность, неизменность своих свойств под влиянием окружающей среды, обладают механической прочностью и теплостойкостью.

Изоляторы изготовлены на 3D-принтере - устройстве, использующем метод послойного создания физического объекта по цифровой 3D-модели. Принтер Dimension SST 1200ES осуществил процесс печати с помощью расплавленного термополимера (FDM) и растворимой поддержки (SST). Для производства 3D-моделей использован промышленный синтетический термополимер ABSplus, обладающий высокой прочностью (до 37 Мпа), устойчивостью к температурам до 80 °С и не растворимостью в воде. Это позволяет отказаться от последующей механической обработки деталей. Термополимер ABSplus обеспечивает высокие клеящие свойства, необходимые для надежного соединения изолятора с токосъемным кольцом.

Подготовка модели начинается с создания чертежа детали в CAD/CAM системе, например, в «Mastercam Design» или «КОМПАС - 3D». Модель в формате «.STL» импортируется в среду «Catalyst EX». В программе «Catalyst EX» выбирается расположение изолятора на печатном столике, его ориентация, тип и расположение поддержки, качество печати и количество копий. Готовый к печати файл отправляется на принтер и осуществляется печать комплекта изолятора.

Напечатанные изоляторы (рис. 3.11, б) были отделены от печатного столика, и в течение суток из них вымывались элементы поддержки в водном растворе в ультразвуковой ванне при температуре 66 – 71 °С.

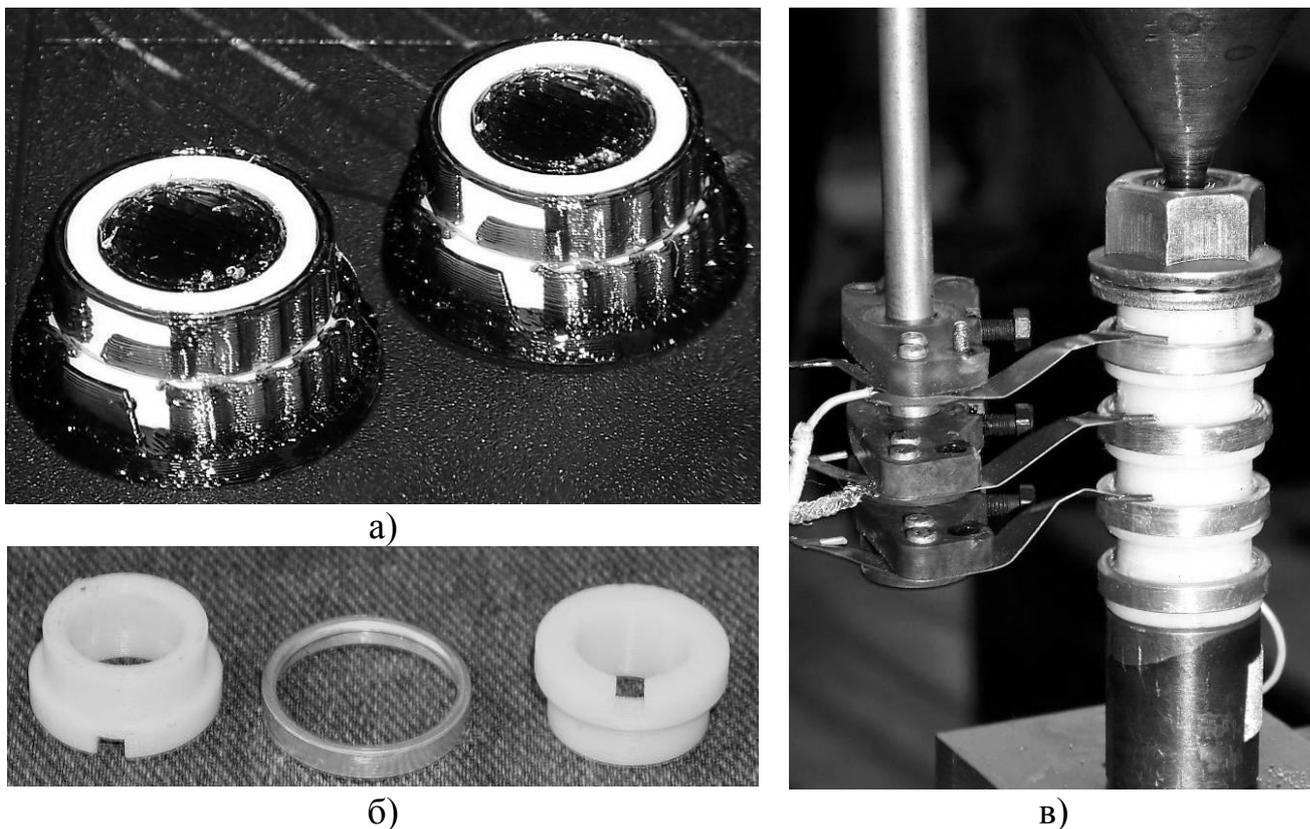


Рис. 3.11. Изолятор:

а –на печатном столике после завершения печати;

б –в комплекте с токосъемным кольцом; в – токосъемный узел в сборе

Полученные экспериментальные результаты проверки работы токосъемных узлов с изоляторами, полученными 3D-печатью, для малых и средних частот вращения, подтвердили соответствие их техническим требованиям, предъявляемым к подобным изделиям, высокое их качество и стабильность работы.

### 3.5 Основные и вспомогательные средства для измерения и регистрации составляющих силы резания

Чувствительность измерительного тракта установки зависит от характера и порядка прилагаемых знакопеременных нагрузок, а также от чувствительности усилителя и коэффициента усиления.

Усилитель размещен в алюминиевом корпусе (рис.3.12) и построен на базе операционного усилителя 140УД6 общего применения средней точности с эмиттерными повторителями на входе и без частотной коррекции. Коэффициент усиления 1000.

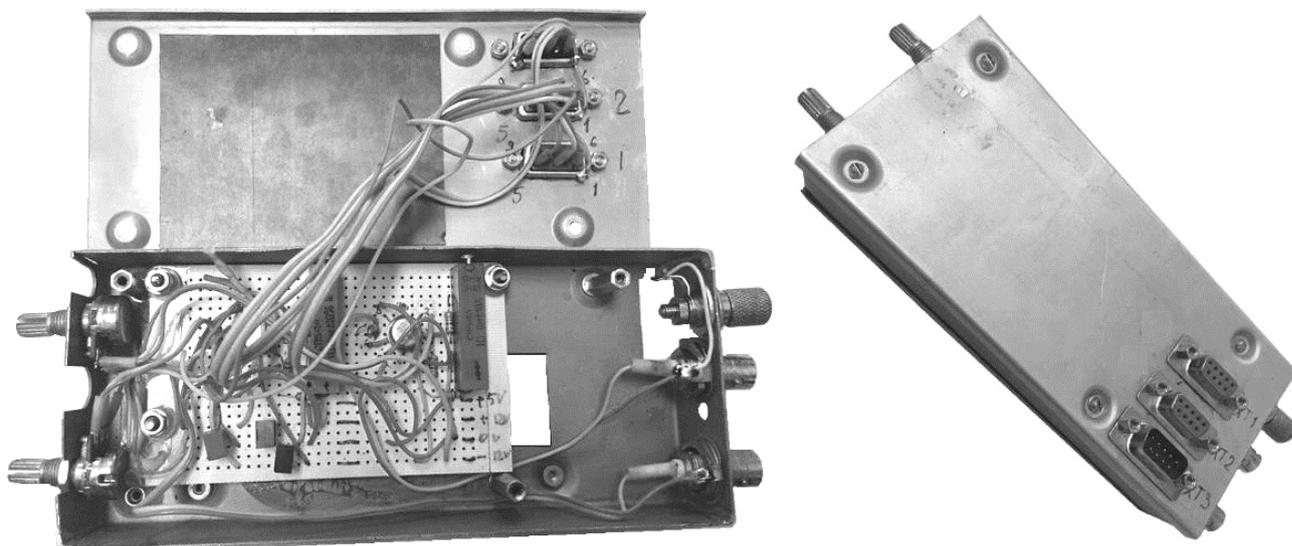


Рис. 3.12. Усилитель

Для точной балансировки «нуля» усилителя в схему введен многооборотный подстрочный резистор с номинальным сопротивлением 10 Ом. Настройка усилителя осуществляется сначала за счет грубого, а затем точного резисторов, при этом на его выходе получается напряжение близкое к нулю в статическом положении измерительной системы.

Внутри корпуса расположена монтажная плата с радиокомпонентами, соединенными согласно схеме (рис. 3.13), где  $R1, R2 = 400 \text{ Ом}$ ;  $R5, R13 = 2 \text{ кОм}$ ;  $R7, R15 = 10 \text{ кОм}$ ;  $R10, R9 = 200 \text{ Ом}$ ;  $R8, R16 = 10 \text{ Ом}$ ; DA1, DA2 – 140УД6;  $C1, C2, C3 = 0,1 \text{ мкФ}$ ;  $C2, C4 = 50 \text{ мкФ} \times 25 \text{ В}$ ,  $C6 = 50 \text{ мкФ} \times 10 \text{ В}$ . На три входных разъема типа D –Sub подаются сигналы с каналов динамометра  $P_z$  и  $P_x$ ; напряжение питания. На боковых стенках корпуса расположены разъемы для подключения осциллографа (в качестве разъемов используются блочные розетки серии CP50), клемма заземления и отверстия.

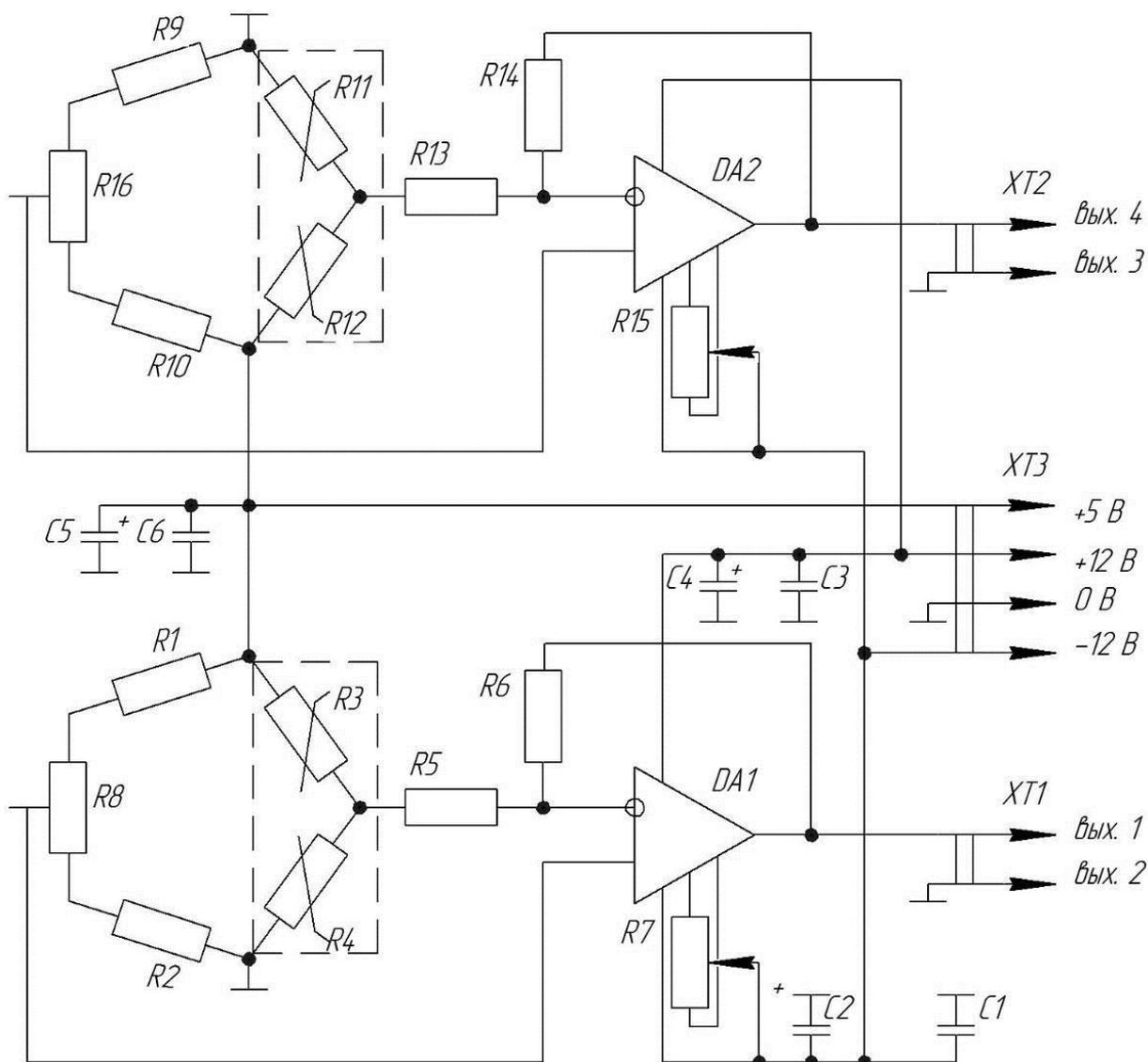


Рис. 3.13. Электрическая схема усилителя

На усилитель действуют внешние источники помех, оказывающие негативное воздействие в виде электромагнитных полей на компоненты схемы усилителя, входные и выходные цепи. Для экранирования от электромагнитных помех усилитель помещен в алюминиевый корпус. Элементы сигнальных цепей соединены проводами МГТФЭ 0,12, что позволило освободиться от электрических помех, действующих на входные и выходные цепи усилителя со стороны других приборов. Для проводов электрических цепей питания, выходящих за пределы корпуса усилителя добавлены фильтрующие цепи.

В ходе исследований осуществлено измерение сигнала и контроль входных и выходных характеристик системы, их запись и расшифровка (рис.3.14) с

помощью USB – осциллографа на базе микроконтроллера C8051F342.



Рис. 3.14. Общий вид регистрирующей аппаратуры и обработки сигнала во время пуско-наладочных работ

Технические параметры осциллографа представлены в табл. 3.9. Погрешность измерения устройства на каждом канале не превышает 1%. USB – осциллограф обеспечивает следующие режимы работы: 2-х каналный осциллограф; 2-х каналный спектр анализатор; 2-х каналный самописец; 16(8)-ти каналный логический анализатор; 8-ми каналный логический генератор.

Таблица 3.9  
Основные технические характеристики USB-осциллографа

Осциллограф, спектроанализатор:	
количество каналов	2
частота дискретизации	100 Гц ... 200 КГц
глубина памяти	1126 отсч./канал, 563 отсч./канал
чтение через буфер:	64К отсчетов/канал (1 или 2 канала)
входное напряжение	-20 ... +20 В
разрядность АЦП	10 бит
синхронизация	абсолютная, дифференциальная, внешняя

Результаты измерений напряжения, прямо пропорционального величине силы резания, передаются по USB-интерфейсу на ПЭВМ и просматриваются в режиме «Цифрового осциллографа» в окне программы «USB-осциллограф», установленного на ПЭВМ. При этом осуществляется оперативный контроль силовых параметров процесса зубообработки.

Для контроля сигналов  $P_z$  и  $P_x$  на протяжении всего цикла исследований использован режим «Самописец», позволяющий сохранить оцифрованные данные в формате, воспринимаемом другими приложениями, например, Microsoft Excel.

Контроль и счет количества резов осуществляется оптоэлектронным датчиком (рис. 3.15, а). Датчик работает в паре с кольцом с отверстиями. Угловое положение кольца на оправке определено по углу таким образом, чтобы отверстия соответствовали положению режущей кромки каждого зуба, расположенного на одном витке экспериментальной сборной червячной фрезы. Счет импульсов происходит при прохождении инфракрасным лучом отверстия. Данные с датчика поступают на счетчик импульсов ARCOM-TC-2400.

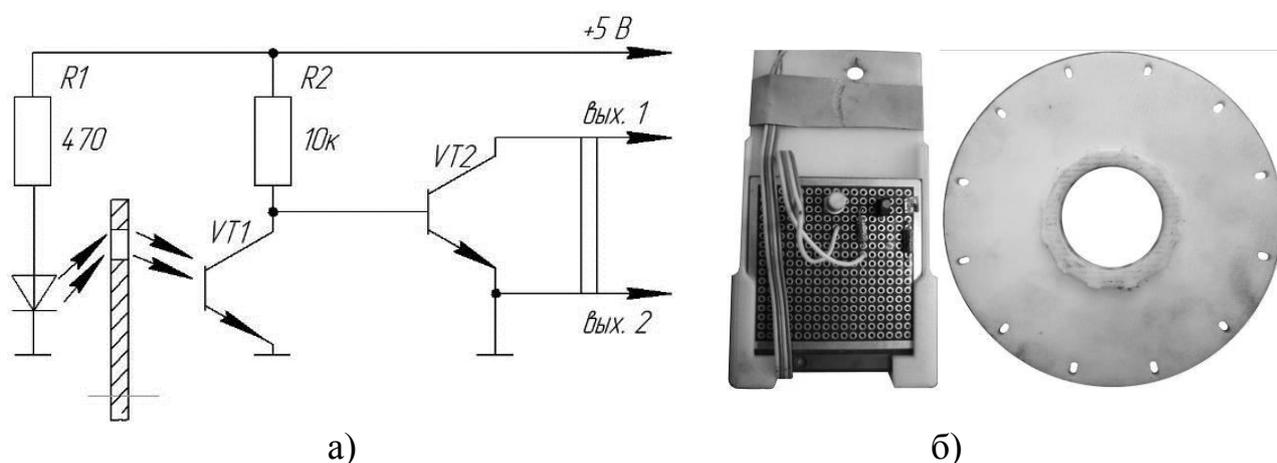


Рис. 3.15. Датчик положения режущих кромок:

а – схема датчика; б – общий вид датчика

Частота вращения элементов системы измеряется при помощи тахометра AR926 с диапазоном измерения от 2,5 об/мин до 99999 об/мин, установленным на штативе и настроенном на сигнальный маркер, приклеенный на оправке.

Контроль температуры компонентов системы и экспериментальных образцов осуществлен бесконтактным пирометром модели TN105i2.

Электропитание установки производит блок питания POWER MASTER AP, имеющий выходные напряжения +12 В, - 12 В, +5 В (рис. 3.14).

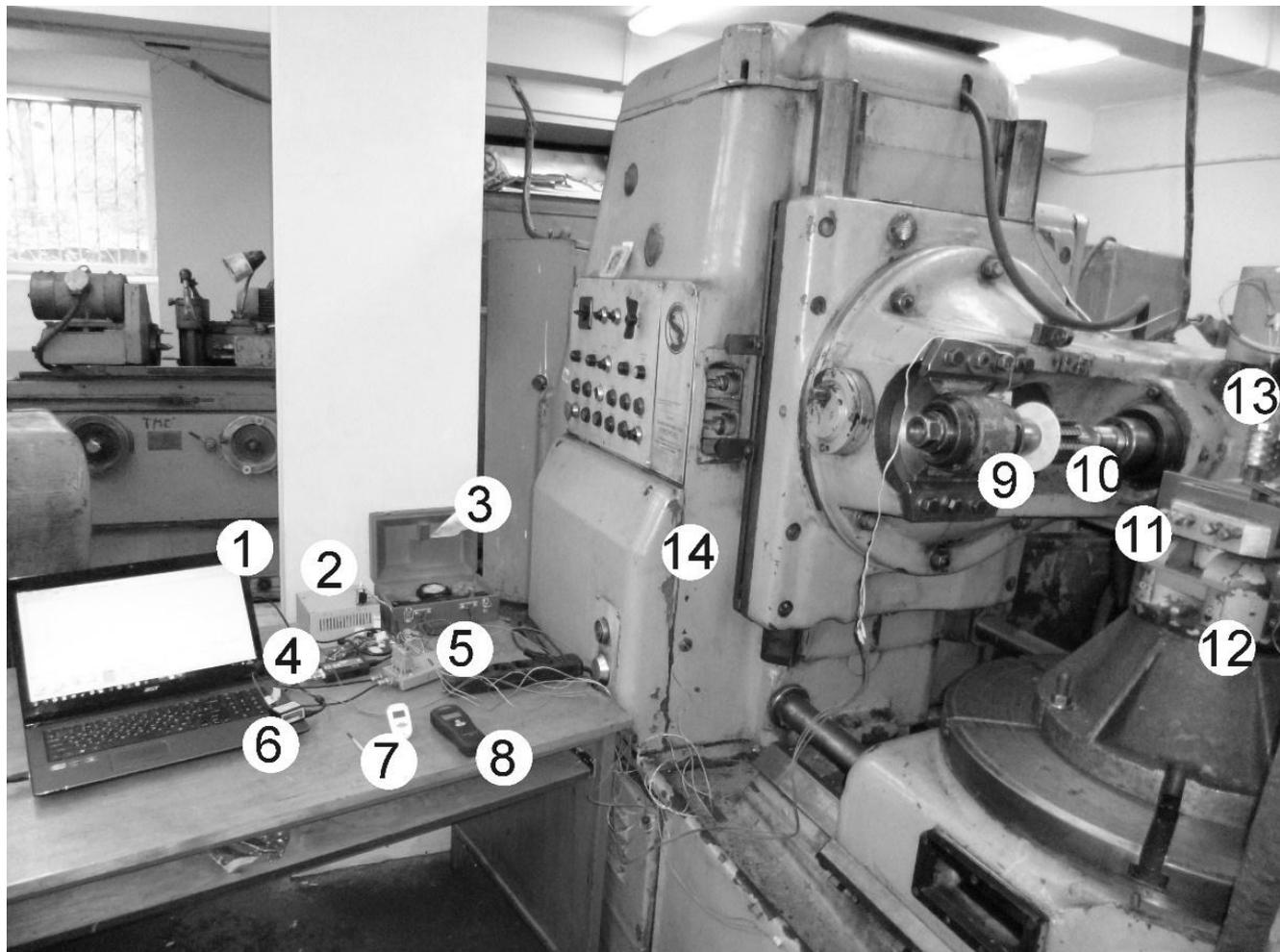


Рис. 3.16. Экспериментально-исследовательский комплекс:

1 – ПЭВМ, 2 - блок питания, 3 - динамометр Токаря, 4- USB-осциллограф, 5 - усилитель, 6 - счетчик импульсов, 7 - пирометр, 8- тахометр, 9 - датчик положения режущих кромок, 10 - фреза, 11 - заготовка, 12 - динамометр УДМ-1200, 13- токосъемный узел, 14- зубофрезерный станок 5К32А

Уровень шума при передаче регистрируемого сигнала является одним из основополагающих моментов обеспечения точности измерений при исследовании процесса зубофрезерования.

Испытания позволили определить изменение переходного сопротивления (показатель уровня шума электрического сигнала) в зависимости от углового положения токоъемных элементов, силы подпружинивания и длины участка линии контакта. Изменение величины переходного сопротивления во времени представлено на рисунке 3.15. Данные получены после холостого вращения, необходимого для снятия оксидной пленки и приработки токоъемников. Предварительно все контактирующие элементы были обезжирены.

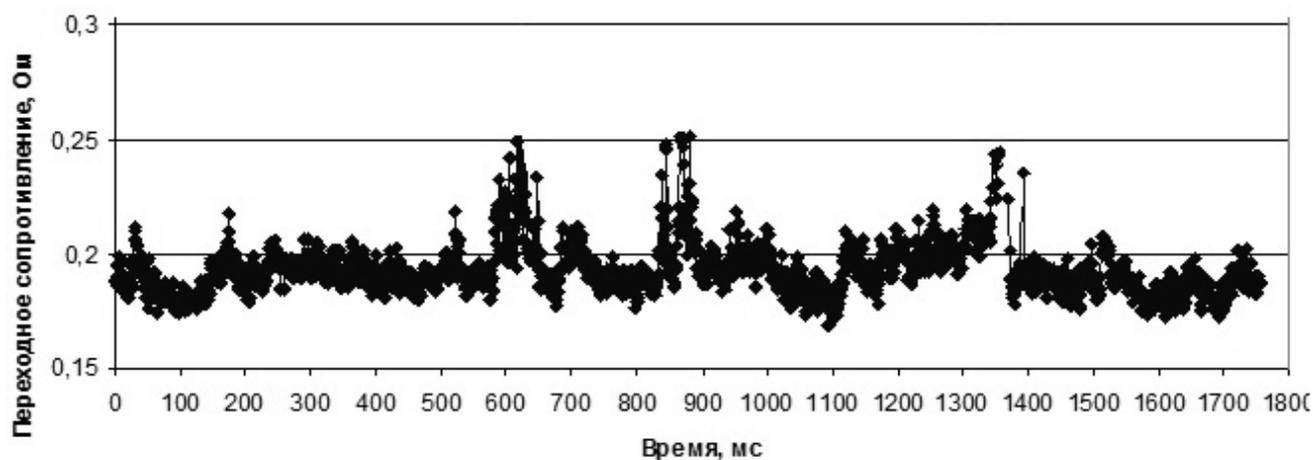


Рис. 3.17. Изменение переходного сопротивления во времени

Из графика видно, что мгновенные величины переходного сопротивления  $R_k$ , возникающие в местах соприкосновения контактов, имеют пульсирующий — пиковый характер; эффективное значение переходного сопротивления  $R_k$  неустойчиво и чувствительно к условиям скольжения и состоянию среды. Переходное сопротивление не превышает 0,25 Ом и составляет не более 20% от уровня полезного регистрируемого сигнала.

### 3.6 Тарирование исследовательского комплекса

Перед измерениями силы резания экспериментально-исследовательский комплекс тарирован в статическом состоянии путем нагружения и разгружения динамометра в направлении действия силы резания способом отдельной тарировки для каждой составляющей силы резания. В процессе тарирования установ-

лена связь составляющих силы резания с величиной напряжения на выходе усилителя при помощи тарировочной характеристики.

Динамометр УДМ1200 установлен на столе зубофрезерного станка 5К32А и подключен к измерительной аппаратуре. Проведено две серии тарировочных испытаний по пять циклов нагружения-разгрузки (рис. 3.18).

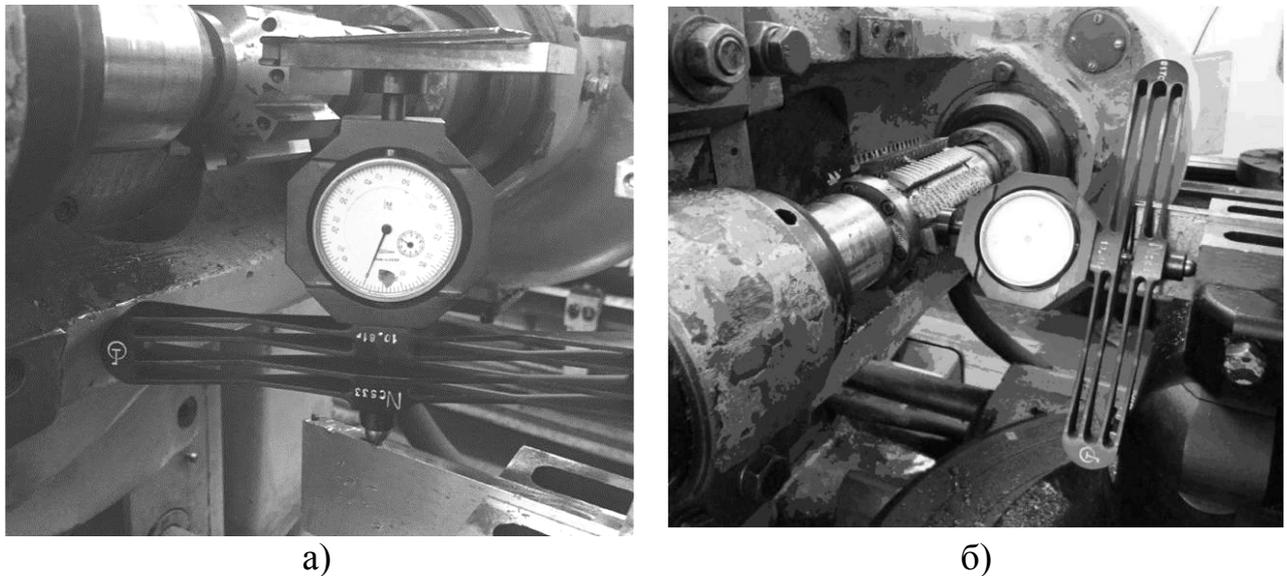


Рис. 3.18. Тарирование установки: а – по каналу  $P_z$ ; б – по каналу  $P_x$

По результатам нескольких серий измерений составлены тарировочные характеристики нагружения и разгрузки (рис. 3.19).



Рис. 3.19. Тарировочные характеристики экспериментальной установки

Для  $P_z$  динамометр устанавливался между заготовкой и пластиной, имитирующей рейку. Нагружение осуществлялось при помощи суппорта станка. Расхождение результатов измерений не превышало 2 %. Во время проведения тарирования температура окружающей среды составляла  $21,2^\circ \text{C}$ .

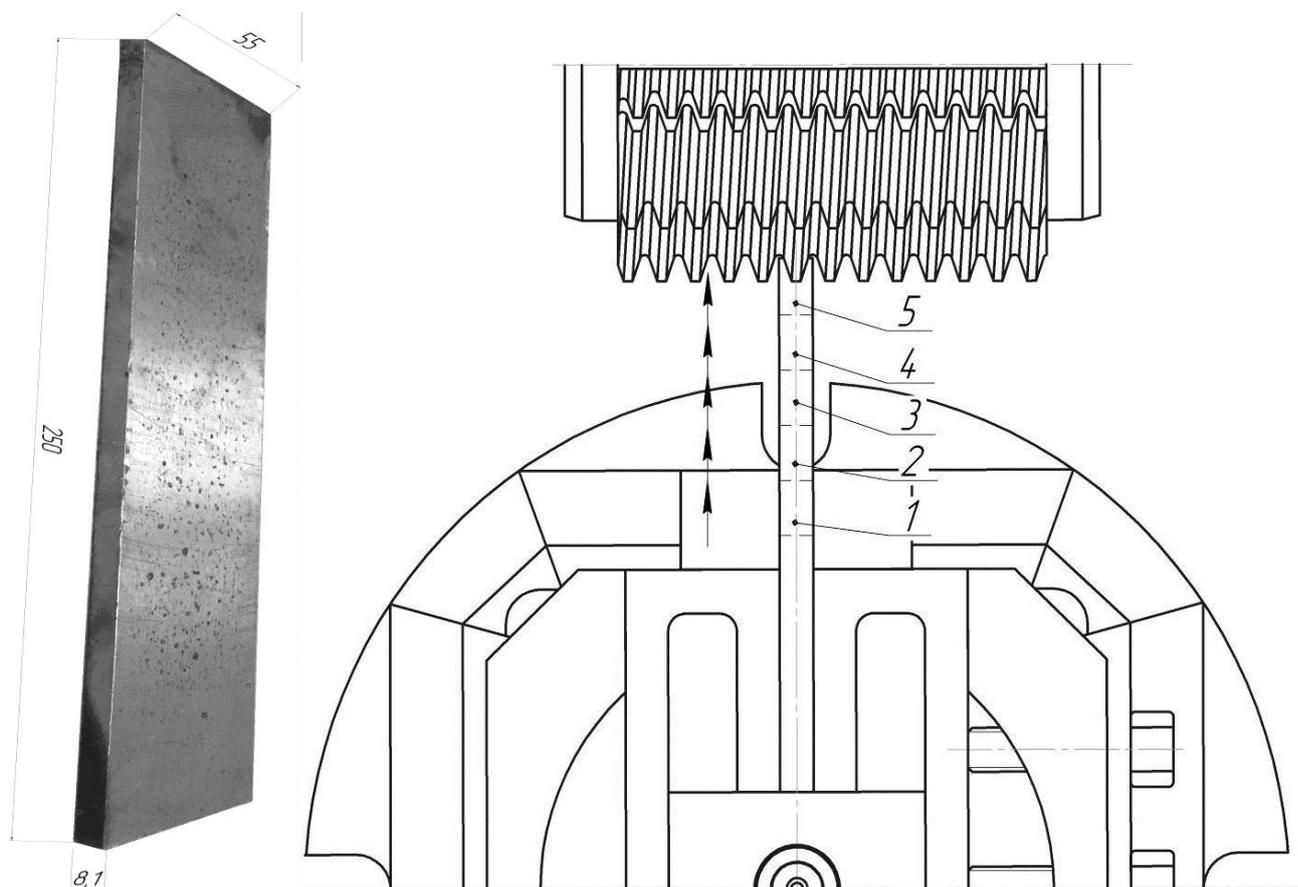
Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что тарировочные характеристики комплекса, состоящего из динамометра УДМ–1200 и тензоусилителя – прямолинейные: для  $P_z = 4191,2U-41,26$ , а для  $P_x = 4192,26U-41,26$ . Коэффициент достоверности аппроксимации прямыми линиями при нагружении  $R^2 = 0,998$ , при разгрузке  $R^2 = 0,997$ . Коэффициент достоверности аппроксимации  $R^2$  показывает степень соответствия характеристик исходным данным. Его значение может лежать в диапазоне от 0 до 1. Чем ближе  $R^2$  к 1, тем точнее описываются имеющиеся данные. Соответственно, значения коэффициентов, полученные при тарировании, свидетельствует о минимальных нелинейных искажениях в измерительной системе, что гарантирует высокую точность и достоверность измерений.

### 3.7 Выбор образцов для проведения силовых исследований

Образцами при исследовании составляющих сил резания являлись пластины из стали 40Х ГОСТ 1050-74 и стали 3сп ГОСТ 380-2005 с размерами  $255 \times 55 \times 8,1$  мм и твердостью 220 - 350 НВ, установленными в приспособлении, закрепленном на столе универсального динамометра УДМ 1200 при помощи винтов. В приспособлении так же имеется паз - канавка для установки токосъемного узла, который так же служит дополнительным элементом жесткости.

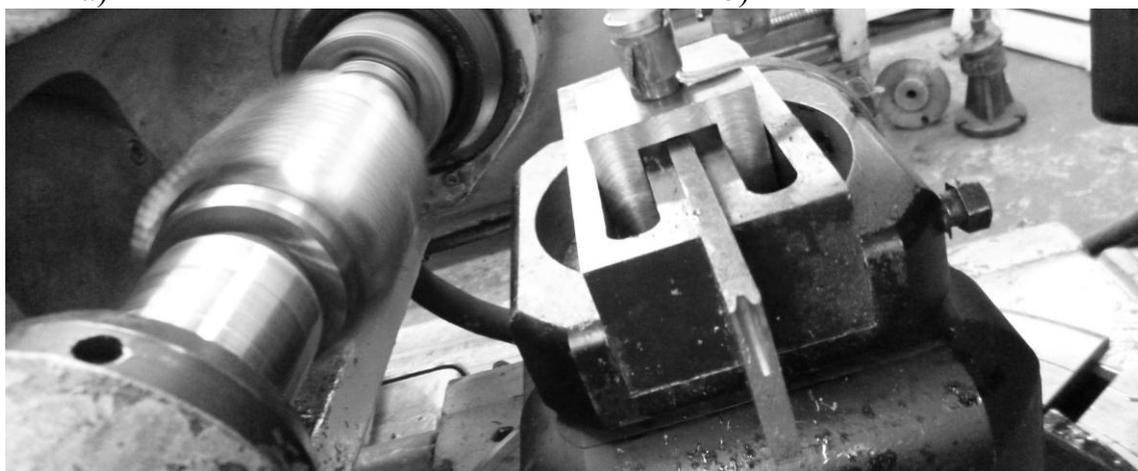
Длина и ширина образца выбрана с учетом конструктивных особенностей динамометра (рис. 3.20, а) и позволяет имитировать цилиндрическое зубчатое колесо с модулем от  $m = 2$  мм и числом зубьев  $z = 80$ . Это ограничение связано с тем, что необходимо обеспечить расстояние для выхода инструмента.

Перед началом очередного опыта пластину необходимо выдвинуть на расстояние от торца динамометра, имитирующее зубчатое колесо требуемого диаметра.



а)

б)



в)

Рис. 3.20. Экспериментальная наладка:

а – образец для исследований; б – схема установки и передвижения образца;

в – приспособление для закрепления образца

После каждого опыта отрезалась часть образца с прорезанной впадиной, и заготовка выдвигался в исходное положение, чтобы обеспечить требуемый диаметр зубьев имитируемого колеса (см. рис. 3.20, б).

### Выводы по 3 разделу

1. Проведенные расчеты позволили разработать конструкцию экспериментальной сборной червячной фрезы, имитирующей обработку зубчатых колес различного модуля и с различным числом зубьев, а также оснастку для ее изготовления. Компьютерное моделирование прочности инструмента выявило участки возможных разрушений фрезы во время перегрузок. Установлено, что конструкция фрез имеет более чем стократный запас прочности. Так экспериментальная фреза на нагрузку  $8588,72 \text{ Н}$  выдерживает без потери целостности при статическом нагружении, а  $6464,29 \text{ Н}$  при динамическом нагружении.

2. В результате анализа положений базовых торцов, косвенно воспроизводящих винтовую линию фрезы, установлено, что все компоненты фрезы изготовлены таким образом, что позволили собрать инструмент класса точности А.

4. Тарирование экспериментальной установки для измерения силы резания при зубофрезеровании показало, что нелинейность системы не превышает 2%. Разработаны отдельные компоненты установки: токосъемный узел, усилитель, датчик определения количества резов, и датчик положения режущих кромок.

5. Установлено, что в экспериментальной установке уровень шума не превышает 20% от уровня полезного сигнала при передаче его от динамометра к USB-осциллографу.

6. Предложено и обосновано использование специальных образцов для проведения серии экспериментальных исследований, представляющих собой пластины из различных сталей, конструктивные особенности которых зависят от модуля и диаметра имитируемого колеса и позволяют вырезать единичную впадину.

## IV СИЛОВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИЯ

### 4.1 Экспериментальное исследование зубофрезерования червячными фрезами

Исследование силовых характеристик процесса зубофрезерования проведено с использованием описанного выше исследовательского комплекса.

На рисунке 4.1 представлено окно программы осциллографа, в центре которого находится рабочий экран, с осциллограммами: верхняя - соответствует каналу  $P_x$ , а нижняя - каналу  $P_z$ . Слева от рамки рабочего экрана расположена шкала напряжения канала  $P_x$ , а справа от рамки - шкала напряжения канала  $P_z$ . Размерность обоих шкал по напряжению  $V$  (Вольт).

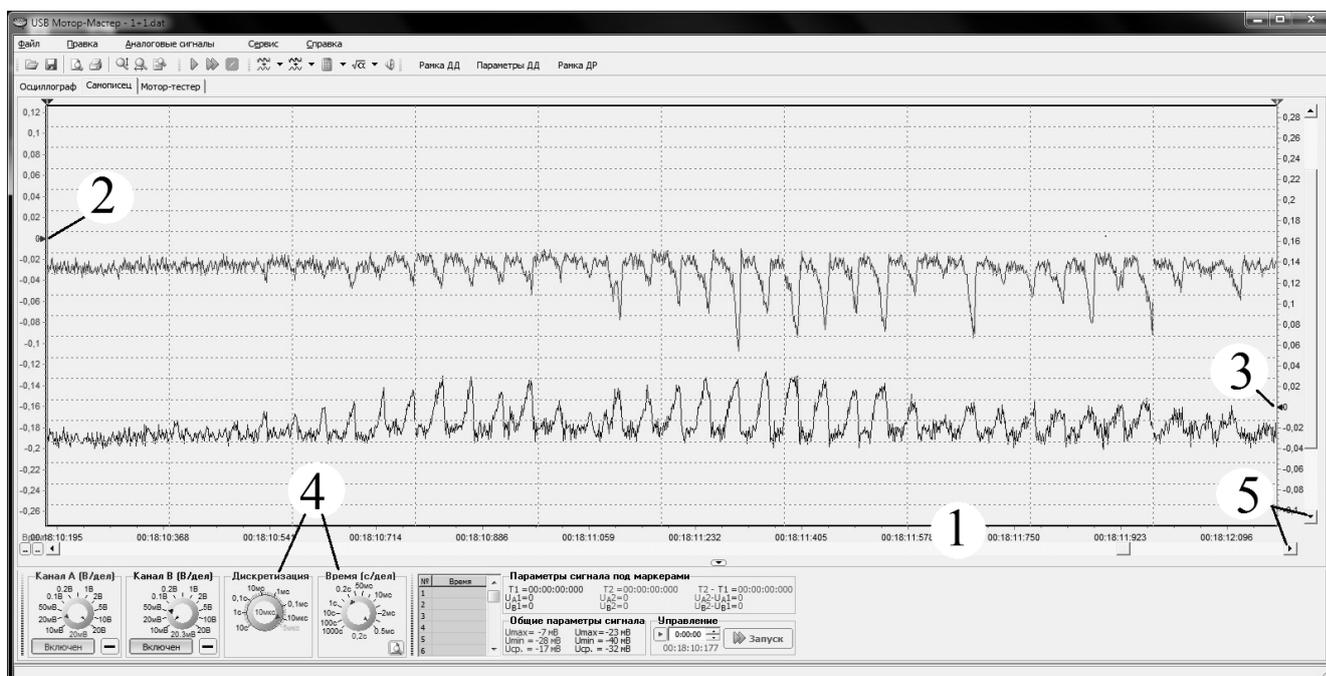


Рисунок 4.1. Фрагмент осциллограммы изменения сигналов  $P_x$  и  $P_z$  :

1 – шкала времени; 2, 3 – указатели сигналов; 4 – маркеры точной настройки;  
5 – линейка прокрутки

Внизу рабочего экрана расположена ось времени 1. Слева и справа от рабочего экрана находятся указатели 2 и 3, позволяющие смещать ноль канала  $P_x$  и канала  $P_z$  соответственно. Смещение нуля проводилось для того, чтобы сигналы

обоих каналов не накладывались друг на друга, что затрудняло бы их анализ. Для установки доступно одно из 9-ти стандартных позиций нуля. Над рамкой рабочего экрана расположены два маркера 4, предназначенные для точного измерения временных интервалов и значений амплитуд напряжений каждого из каналов. Маркеры можно передвигать с помощью мыши.

Для перемещения осциллограмм внутри рабочего экрана имеется стандартная линейка прокрутки 5, под которой находится кнопка, позволяющая скрыть панель настроек осциллографа, что обеспечивает больше места для рабочего экрана. Перемещение осциллограмм по вертикали и горизонтали возможно перетаскиванием соответствующих осей (горизонтальной - вправо-влево, вертикальных - вверх-вниз).

Цена деления шкал напряжений для каналов составляющих сил резания  $P_x$  и  $P_z$  задается на панели "Канал A/B (В/дел)" с помощью ручки настройки. USB осциллограф DiSCO аппаратно поддерживает два диапазона входных сигналов 0-2 В и 2-20 В. Из этого следует, что для получения достоверной осциллограммы, амплитуда которой находится в диапазоне  $\pm 2$  В, целесообразно выбрать размах  $\pm 0,2$  В/деление или меньше. Ошибка квантования (разбиения диапазона значений на конечное число интервалов) при размахе  $\pm 0,2$  В/деление и меньше будет составлять  $4В / 1024 = 0,0039$  В (разрядность 10 бит), в то время как при цене деления шкал  $\pm 0,5$  В/деление и больше ошибка квантования будет в 10 раз больше –  $40В / 1024 = 0,039В$ . У осциллографа DiSCO2 12 поддиапазонов, поэтому ошибка квантования менее заметна. На этих же панелях расположены кнопки включения/выключения каналов. Выключение одного из каналов позволит увеличить частоту дискретизации с 100 кГц до 200 кГц. Во время работы осциллографа рядом с кнопкой включения/выключения канала появляется кнопка открытого/закрытого входа с символами [ - ] и [ ~ ], включающая установленное в приборе микрореле, замыкающее выводы внутреннего конденсатора, предназначенного для фильтрации постоянной составляющей сигнала.

Панель "Период" позволила задавать развертку, с которой происходит отображение входного аналогового сигнала. Частота дискретизации подбиралась автоматически. В правом нижнем углу панели "Период" расположена кнопка переключения режима чтения: buf - чтение с использованием внутреннего буфера прибора, pipe - потоковое чтение данных в компьютер (в несколько раз увеличивается размер буфера отсчетов, но ужесточаются требования, предъявляемые к компьютеру). Все элементы управления синхронизацией, за исключением маркеров, расположены на панели "Синхронизация". Кнопка "Включена/Выключена" управляет синхронизацией. Кнопками "А" и "В" выбирают канал и соответствующий маркер, сигнал с которого будет использован в качестве источника синхронизации. Использование кнопки "Ext" подключает внешний источник синхронизации логического анализатора, который работает как вход (внешняя синхронизация доступна только при чтении через буфер) в канал В1.

Кнопки выбора фронта определяют, по какому фронту сигнала (нарастающему или спадающему) будет абсолютная синхронизация, по какому перепаду сигнала (положительному или отрицательному) будет дифференциальная синхронизация и по какому фронту внешнего синхросигнала (нарастающему или спадающему) будет внешняя синхронизация. Две кнопки, расположенные внизу панели, определяют тип синхронизации: абсолютная или дифференциальная. Поле, расположенное возле кнопки задания дифференциальной синхронизации, определяет разницу между соседними отсчетами сигнала при превышении, которой будет выполнение условия синхронизации. Необходимо отметить, что при задании параметров синхронизации, которые не могут быть выполнены, например, задан уровень  $5B$ , а максимальная амплитуда сигнала не превышает  $2B$ , прибор все время будет находиться в ожидании выполнения условия синхронизации, т.е. одна из кнопок запуска измерения будет красной. В данном случае не обязательно останавливать измерения, нажимая кнопку "Сброс", так как при изменении любых условий синхронизации они автоматически будут переданы в устройство.

На панели "Общие параметры сигнала" отображаются вычисленные значения постоянной и переменной составляющих напряжения и, если возможно, то и величина частоты по каждому каналу.

Для осуществления измерения необходимо нажать кнопку "Однокр." или "Цикл." на панели "Управление". Кнопка "Однокр." инициализирует только одно измерение (оцифровка и накопление отсчетов микроконтроллером, а затем передача их оболочке при работе через буфер), после чего на рабочем экране отображаются только что считанные осциллограммы. Кнопка "Цикл. т" выполняет аналогичные действия за исключением того, что после окончания измерения автоматически запускается новое измерение. После нажатия на одну из кнопок запуска она меняет свое название на "Сброс" красного цвета, нажатие на такую кнопку вызывает немедленный сброс устройства и прекращение ожидания результатов измерения.

Далее осуществлена обработка осциллограмм. Задачей обработки является извлечение из них необходимых сведений о величинах, составляющих силы резания. Обработка осциллограмм начиналась с определения масштабов записи: горизонтального (временного) - по отметкам (маркам) времени, вертикального - по рабочему участку амплитудно-частотной характеристики при записи. Далее она сохранялась в текстовый документ формата «.txt» и преобразовывалась в таблицы MS Excel. С помощью тарировочной характеристики измерительной системы произведен перевод  $mB$  в  $H$  и по полученным данным построены графики зависимости силы резания от номера оборота заготовки.

На рисунке 4.2 представлены график изменения составляющих силы резания и соответствующие ей стружки при вырезании единичной впадины зубчатого колеса модуля  $m = 2\text{мм}$  с числом зубьев  $z_1 = 112$  за один оборот заготовки. Исходными данными являются результаты обработки осциллограммы (табл. 4.1). Из графика и таблицы видно, что при вырезании впадины сила резания возрастает при формировании ножки зуба и затем уменьшается при формировании вершины.

Локальный экстремум в точке 2 свидетельствует об ударе во время врезания инструмента в заготовку.

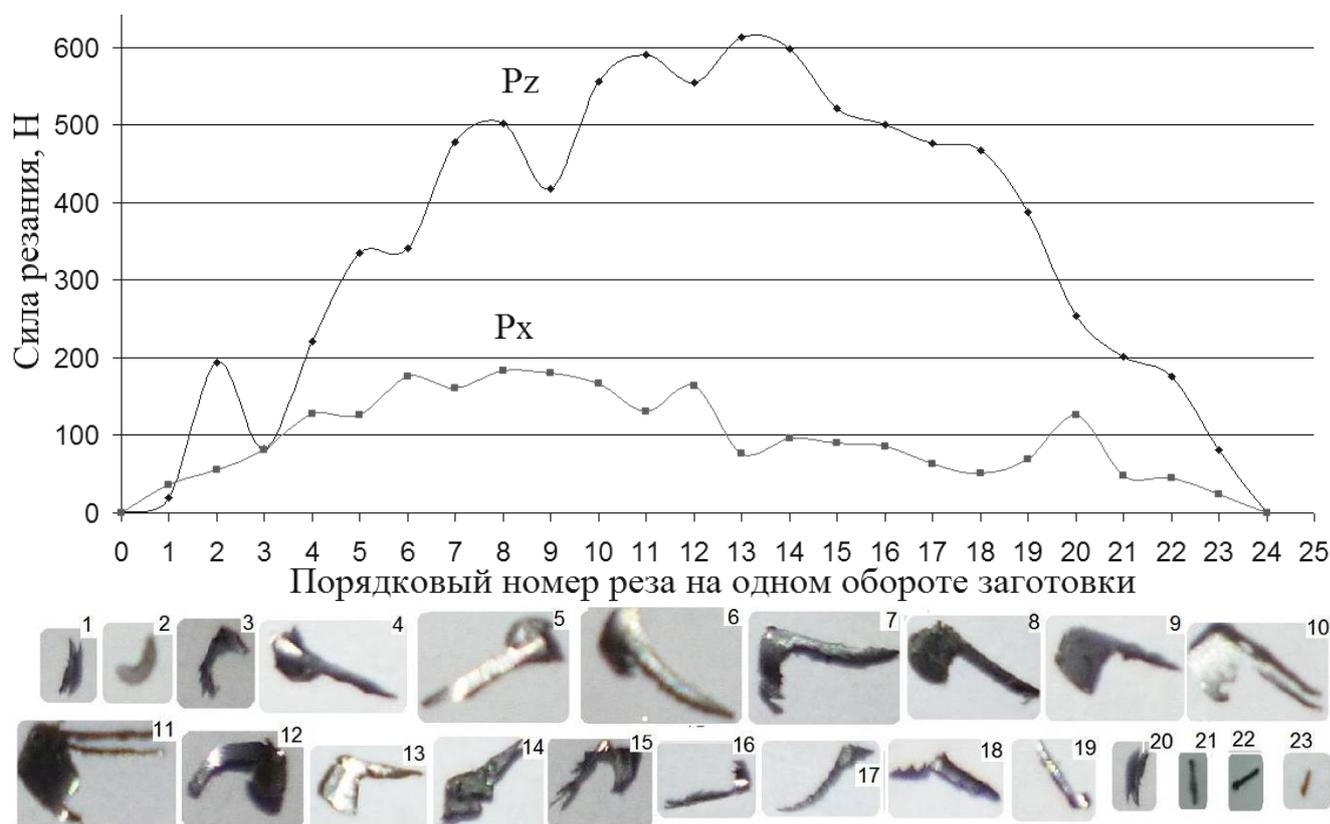


Рис. 4.2. Составляющие силы резания за один оборот заготовки

В таблице 4.1 максимальные величины составляющих силы резания на рассматриваемом обороте заготовки:  $P_z = 613,2166 \text{ Н}$  и  $P_x = 183,6814 \text{ Н}$ . Соответственно в таблицах 4.2 - 4.4 представлены максимальные величины силы резания  $P_x$  и  $P_z$ , являющиеся средними арифметическими серии из 5 опытов, на каждом обороте заготовки. Полученные данные являются исходными для определения составляющих силы резания при зубообработке зубчатого колеса. В соответствии с (2.6) для  $P_z$  получим: сила резания первой рейкой  $P_1 = 19,7846$ ; второй рейкой  $P_2 = 19,784 + 193,927$ ; третьей рейкой  $P_3 = 19,784 + 193,927 + 82,8983$ ; четвертой рейкой  $P_4 = 193,9276 + 82,89838 + 220,4957$  и т.д.

Таблица 4.1

Составляющие силы резания за один оборот заготовки

Время	Порядковый номер реза	$P_z, \text{ Н}$	$P_x, \text{ Н}$
0:56:45:718	0	0	0
0:56:48:140	1	19,7846	35,5876

0:56:50:562	2	193,9276	55,50842
0:56:52:984	3	82,89838	80,689
0:56:55:406	4	220,4957	127,1862
0:56:57:828	5	335,5856	126,3871
0:57:00:250	6	341,7345	175,291
0:57:02:672	7	478,1717	161,3071
0:57:05:094	8	501,7233	183,6814
0:57:07:516	9	416,9142	180,5867
0:57:09:938	10	556,1357	166,8208
0:57:12:360	11	590,4771	130,6223
0:57:14:782	12	554,3955	163,8642
0:57:17:204	13	613,2166	76,60423
0:57:19:626	14	597,6702	95,94205
0:57:22:048	15	521,2143	89,54938
0:57:24:470	16	500,0991	86,35305
0:57:26:892	17	476,7794	63,41935
0:57:29:314	18	467,498	51,51301
0:57:31:736	19	388,0257	68,61339
0:57:34:158	20	253,4448	125,7479
0:57:36:580	21	201,6579	48,63631
0:57:39:002	22	176,3469	44,96052
0:57:41:424	23	80,9632	23,5765
0:57:43:846	24	0	0

Фрагменты, иллюстрирующие работу установки, представлены на рис 4.3.

Во время проведения экспериментов вырезалась как впадина, так и зуб.

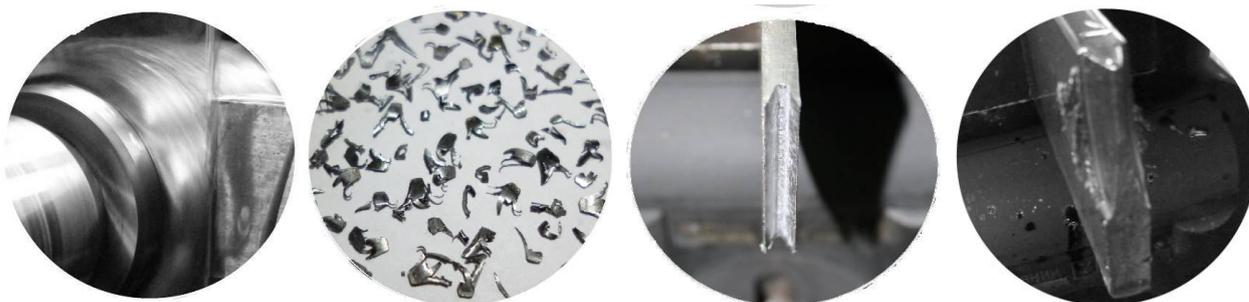


Рис. 4.3. Работа экспериментальной установки

В таблице 4.5 представлены результаты опытов, полученные при анализе осциллограмм, записанных во время измерения силы резания при вырезании единичной впадины на подаче  $S_0 = 2$  мм/об, зубчатых колес с модулем  $m = 2$  и числом зубьев  $z_1 = 112$ . Аналогичные опыты проводились при подачах  $S_0 = 1$  мм/об и  $S_0 = 4$  мм/об.

Таблица 4.2

Составляющие силы резания  $P_x$  и  $P_z$  при исследовании влияния СОЖ

Отсутствие СОЖ		Подача СОЖ	
$P_x, Н$	$P_z, Н$	$P_x, Н$	$P_z, Н$
0	0	0	0
25,8152	92,8584	25,8152	159,9176
99,59792	159,9176	24,0005	162,0062
163,3194	226,9768	59,3528	226,9768
166,6731	253,8005	92,8904	260,5064
180,0882	300,7419	91,673	294,036
182,0342	361,0952	95,743	361,0952
193,5032	394,6248	109,6592	363,9703
200,2107	441,5662	126,428	362,8525
206,9182	495,2136	124,3864	377,86
213,6258	595,8024	123,7939	428,1544
220,3333	629,332	125,8552	430,0206
227,0408	662,8616	127,8245	425,3334
224,4118	660,0076	159,9656	427,3024
225,1369	660,6364	158,6010	495,2136
224,189	664,8760	161,1855	562,2728
223,7434	662,7996	157,6288	564,5134
222,6541	661,8349	156,5155	564,3874
225,4502	661,9063	160,2636	561,5384
222,3904	696,3912	160,2618	563,6783
224,9265	703,0971	161,0492	563,6081
226,0518	703,0971	156,4315	561,3827
227,1163	696,3912	156,2379	560,8725
223,4105	696,2514	159,4888	564,8602
224,0045	698,9106	159,2809	559,3881
223,9074	671,244	157,2883	595,8024
225,804	674,1302	157,8603	597,6874
227,5531	662,8616	160,8887	594,3600
226,874	663,6232	158,4771	596,4206
229,0115	661,4776	159,6110	594,4670
228,673	664,8666	160,5554	592,5789
228,3067	664,4611	159,3383	562,2728
225,662	661,5713	162,0980	528,7432
227,004	663,7809	157,6207	531,0255
223,065	660,1991	158,0636	526,6155
229,0011	664,8552	156,4689	528,6236
224,0673	663,5703	160,6829	530,0370
220,3333	661,0015	158,4806	525,6883

221,6503	664,1960	157,4852	550,1552
224,5359	662,0412	161,3652	560,9037
227,8863	659,5347	156,4202	562,1035
229,0815	659,8467	160,3288	560,8468
227,4046	663,1757	161,3154	561,6506
225,4802	660,7364	159,1197	564,9957
229,9031	661,2598	156,2262	564,6581
227,5499	659,7011	159,1201	564,5321
222,3893	662,6153	161,9415	561,6242
218,0052	663,2111	160,3920	560,5151
192,7509	664,6943	160,4440	560,684
192,6630	664,2071	159,9711	562,863
191,4716	662,8309	157,0149	558,0954
190,5541	660,3041	160,0456	563,6962
192,8346	661,8443	160,1787	528,7432
159,9656	660,6546	157,1849	526,6420
156,4917	659,0093	158,3687	527,6041
160,8441	662,8616	160,5802	529,3212
156,6567	660,5468	160,7313	495,2136
124,9077	640,6585	156,4457	495,4465
126,8216	610,5451	161,1056	493,5526
127,6336	580,5485	158,6057	497,1094
123,1781	528,7432	126,428	496,5629
123,7257	495,2136	129,652	494,1586
126,8465	461,684	92,8904	495,9308
100,8951	464,0276	94,0297	493,6866
80,5485	420,5868	94,6661	493,0762
59,3528	394,6248	93,1291	461,684
24,8111	392,6006	59,3528	428,1544
22,5715	327,5656	25,8152	394,6248
25,6140	260,5064	25,1932	361,0952
26,9928	200,6848	27,3143	226,9768
24,7498	159,9176	9,0464	159,9176
0	0	0	0

Таблица 4.3

Влияние переднего угла на составляющие  $P_x$  и  $P_z$  силы резания

$\gamma_a = 0^\circ$		$\gamma_a = 2,5^\circ$		$\gamma_a = 5^\circ$	
$P_x, H$	$P_z, H$	$P_x, H$	$P_z, H$	$P_x, H$	$P_z, H$
0	0	0	0	0	0
26,5459	93,53488	14,42918	68,73543	22,78348	79,73324
94,56728	263,2785	50,548	168,25	50,515	130,98

140,8484	275,494	70,11837	206,2297	86,82696	230,9748
162,4809	300,8993	100,9488	255,78	120,8441	280,82
165,5008	365,1246	125,8076	288,7263	150,8704	321,7197
196,4377	399,0734	135,6848	316,2251	150,8704	351,968
198,6843	466,9708	153,6521	371,2229	182,8922	412,4646
199,0116	500,9195	152,2782	398,7217	179,6709	442,713
196,4150	534,8682	154,2739	426,2206	182,1425	472,9613
197,1200	555,848	155,4117	439,22	181,9291	469,9063
230,3946	568,817	154,3631	453,7194	180,5638	503,2096
227,9562	602,7657	181,4967	481,2183	214,9139	533,4579
230,0740	636,7144	183,4431	508,7171	212,8533	563,7062
231,3672	670,6631	183,9735	536,216	215,9145	593,9545
229,5436	704,6118	178,3771	563,7149	216,4524	624,2028
227,1531	738,5606	182,5154	591,2137	215,9462	654,4511
231,8527	750,8489	182,3419	600,21	215,7188	652,5028
227,7398	772,5093	178,4326	618,7126	212,5318	684,6994
230,3589	769,8248	178,7552	617,7828	215,9411	682,4402
228,9004	771,2091	182,3518	617,1646	213,2271	685,8966
228,8160	774,7346	181,0168	617,0882	217,0979	684,2480
232,6430	774,0794	179,3594	617,0132	216,0856	685,9140
232,3503	772,4177	179,4646	616,1026	214,5937	682,4504
230,7081	770,4807	178,9374	619,7695	211,6036	686,5891
229,1458	773,0271	182,4386	616,9352	214,2116	682,4048
232,4614	774,4330	183,1658	617,0606	212,4491	683,2096
232,8487	771,5946	179,4318	616,9524	216,8091	686,9699
232,6128	773,5171	180,9370	620,4711	213,6969	684,6855
227,5267	769,5751	182,7223	615,2534	215,8007	686,8319
231,0614	771,9576	180,4873	616,9917	214,8520	684,0587
231,4011	769,5716	179,9239	619,3083	214,0455	685,1078
196,4377	771,2600	181,9760	620,1213	214,2722	686,6482
194,6009	771,0188	153,4157	618,4372	182,8922	686,0735
194,5189	750,5848	152,9640	591,2137	181,1686	654,4511
162,4809	738,5606	154,1718	592,6904	182,1324	651,1047
163,2484	737,5443	125,8076	592,3065	150,8704	651,1185
160,7213	704,6118	123,4406	563,7149	147,1086	624,2028
163,9583	702,6532	127,4272	565,3013	148,6518	621,3944
160,5837	706,4007	126,5734	562,5024	147,3328	625,1103
162,7922	670,6631	122,6281	536,216	147,2843	593,9545
164,6416	667,4466	127,8164	537,8365	148,1740	590,9723
160,3434	669,5413	127,2064	534,9186	150,5812	591,2053
162,5410	669,1508	127,4570	538,7959	153,0275	590,1154
161,8530	636,7144	125,3464	508,7171	152,2728	563,7062
164,3855	634,2335	125,0726	505,9924	147,6170	563,1147

159,2573	634,2846	123,6099	506,5862	152,3282	561,5661
160,3877	638,7608	123,2286	508,3670	147,7211	562,8633
160,2057	637,0800	126,3133	507,4372	147,9134	563,3342
128,5241	638,2269	122,1222	506,7475	147,2178	563,9577
127,1943	602,7657	97,96296	481,2183	118,8487	533,4579
127,1768	590,515	94,6729	479,0643	119,0498	535,9392
130,4744	568,817	99,0149	453,7194	117,1951	503,2096
129,0848	565,8359	98,8715	453,6640	117,1943	500,2380
130,515	569,9382	96,9333	453,8213	118,7941	505,6714
132,0705	570,1580	100,659	451,9811	120,948	502,4594
125,5098	568,2799	101,0057	454,5846	119,149	505,4052
130,8896	566,5191	99,0932	452,8369	117,7638	503,0777
130,4839	565,6984	99,5226	454,2516	120,0130	501,7231
94,56728	567,9412	96,5064	453,1940	120,7170	504,9343
94,9830	568,8380	70,11837	453,9977	86,82696	505,0238
96,2712	565,7939	69,6309	454,6485	86,4229	504,2647
96,3435	534,8682	69,3773	426,2206	86,6226	472,9613
60,61046	500,9195	68,3075	398,7217	86,2331	442,713
57,1124	494,1298	42,27378	393,2219	54,80522	436,6633
62,4380	466,9708	39,2314	371,2229	53,1215	412,4646
26,65364	433,0221	43,0074	343,724	56,3709	382,2163
26,6111	365,1246	14,42918	288,7263	22,78348	321,7197
27,5570	297,2272	11,5683	233,7286	22,7193	261,2231
28,3964	229,3298	11,8609	178,7309	19,3648	200,7265
11,26	161,4323	14,4904	123,7331	22,2908	140,2299
0	140	0	0	0	0

Таблица 4.4

Влияние подачи на составляющие  $P_x$  и  $P_z$  силы резания

$S_0 = 1 \text{ мм/об}$		$S_0 = 2 \text{ мм/об}$	
$P_x, H$	$P_z, H$	$P_z, H$	$P_x, H$
0	0	0	0
14,42918	68,73543	103,10314	21,64378
50,00000	168,25000	309,34457	105,17760
70,11837	206,22970	433,08942	188,71130
100,00000	255,78000	556,83428	200,00000
125,80760	288,72630	639,33085	230,47820
135,00000	316,22510	680,57914	250,00000
153,65210	371,22290	763,07571	272,24510
154,05458	398,72170	845,57228	271,15309
153,52883	426,22060	900,31500	271,19975
152,57584	439,22000	928,06885	272,50439

154,02064	453,71940	928,42914	272,65301
181,49670	481,21830	927,84325	272,80192
181,25938	508,71710	928,25637	271,72984
180,60646	536,21600	928,23059	272,92452
181,20973	563,71490	927,80664	250,00000
181,98533	591,21370	927,91616	240,00000
181,03619	600,21000	927,71443	230,47820
180,39463	618,71260	886,82056	200,00000
181,40787	618,34587	845,57228	188,71130
181,66092	617,80894	825,57850	189,05021
181,34606	617,92063	804,32399	187,59493
180,45382	617,78722	805,39602	187,22551
180,34791	618,82853	780,00000	189,07757
180,51489	617,53784	757,98853	188,34250
180,81823	618,78063	763,07571	187,50406
180,91202	618,81558	721,82742	160,00000
181,31437	618,71553	700,00000	146,94440
180,83328	617,79073	680,57914	150,00000
180,84365	617,88345	679,88473	145,95344
180,23526	618,68175	680,21699	146,47399
180,92345	617,45757	680,79054	125,00000
180,62145	617,65921	598,08256	105,17760
153,65210	618,26077	556,83428	63,41067
153,53332	591,21370	433,08942	21,64378
153,47009	590,40616	268,09628	22,49042
125,80760	591,48251	130,3540	10,02050
124,33851	563,71490	0	0
124,98407	564,08074	0	0
124,23651	562,54627	0	0
124,90397	536,21600	0	0
124,57452	537,08237	0	0
125,70899	536,09419	0	0
124,49911	536,54094	0	0
125,83371	508,71710	0	0
125,79123	507,96026	0	0
125,56612	507,95004	0	0
124,97407	507,41878	0	0
124,96105	508,44068	0	0
125,99583	508,95734	0	0
97,96296	481,21830	0	0
96,87484	480,69350	0	0
97,01712	453,71940	0	0
96,78090	453,68997	0	0

97,77173	453,39877	0	0
100,00000	452,91252	0	0
100,64394	452,92513	0	0
96,88466	453,09961	0	0
97,24026	452,23920	0	0
98,02739	452,56545	0	0
70,11837	452,66883	0	0
70,11761	453,84299	0	0
70,88279	426,22060	0	0
69,81536	398,72170	0	0
42,27378	393,22190	0	0
42,46128	371,22290	0	0
42,55540	343,72400	0	0
14,42918	288,72630	0	0
13,53939	233,72860	0	0
13,55674	178,73090	0	0
14,67690	123,73310	0	0
0	0	0	0

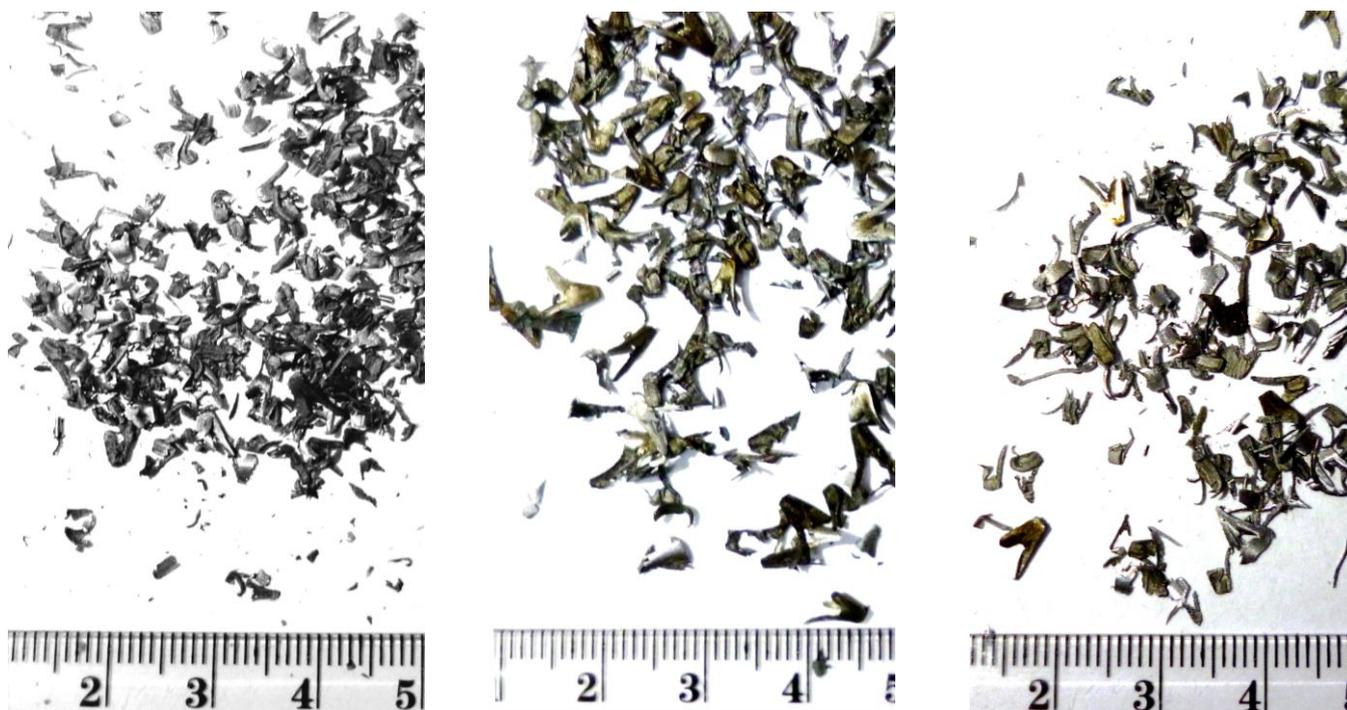
Таблица 4.5

Составляющие силы резания при проведении серии экспериментов

1 опыт		2 опыт		3 опыт		4 опыт		5 опыт	
$P_z, H$	$P_x, H$								
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
84,47	0,652	86,76	1,45	83,57	1,67	84,47	2,15	84,49	2,65
168,3	84,476	169,31	85,57	168,73	86,47	168,3	88,47	170,31	86,47
377,86	168,3	374,81	169,31	375,87	170,13	377,86	169,35	378,86	180,32
503,59	168,3	500,56	167,23	505,91	171,89	503,59	168,34	508,59	178,13
587,42	252,12	586,41	258,22	586,52	256,12	587,42	252,12	586,42	254,62
629,33	314,99	630,31	312,99	630,34	314,99	629,33	314,99	632,83	316,95
629,33	335,94	628,39	334,94	628,37	337,44	629,33	335,94	629,98	335,94
671,24	356,90	671,64	358,92	671,74	358,97	681,28	356,90	671,24	356,90
713,15	377,86	715,25	378,6	713,15	368,16	713,15	374,46	713,15	378,79
755,06	377,86	756,16	377,86	756,6	378,89	755,06	375,87	754,46	380,84
796,98	377,86	797,98	377,82	798,98	377,86	800,16	376,25	801,88	372,8
776,02	377,86	777,12	377,84	778,12	377,85	776,02	377,85	790,42	371,61
713,15	377,86	711,15	377,86	715,75	378,15	713,15	377,86	728,45	372,46
671,24	377,86	672,34	377,88	672,25	378,46	671,24	377,89	671,24	376,87
629,33	335,94	630,31	335,94	630,38	335,94	629,35	335,24	629,33	334,91
545,50	294,03	545,51	291,03	549,54	294,03	545,50	294,03	545,59	294,03
524,55	252,12	522,53	253,14	528,45	255,12	525,95	252,12	524,55	252,12
503,59	168,34	501,17	170,3	503,59	168,31	503,59	171,35	521,44	169,83

377,86	126,38	378,88	125,47	379,64	126,38	377,86	126,38	378,61	128,81
252,12	84,476	250,82	81,48	258,92	84,47	252,12	85,44	254,52	81,34
126,38	21,68	121,85	20,60	124,84	21,64	130,85	21,68	129,58	19,58
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Форма и размеры стружек при зубофрезеровании различны для каждого реза и зависит в большей степени от подачи (рис 4.4).



а)

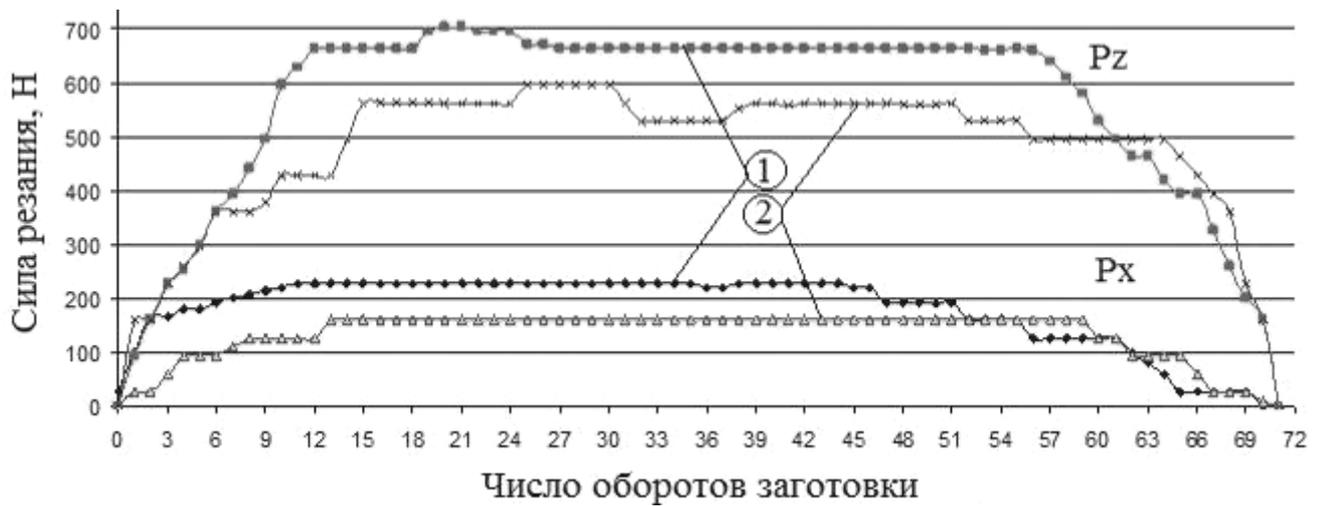
б)

в)

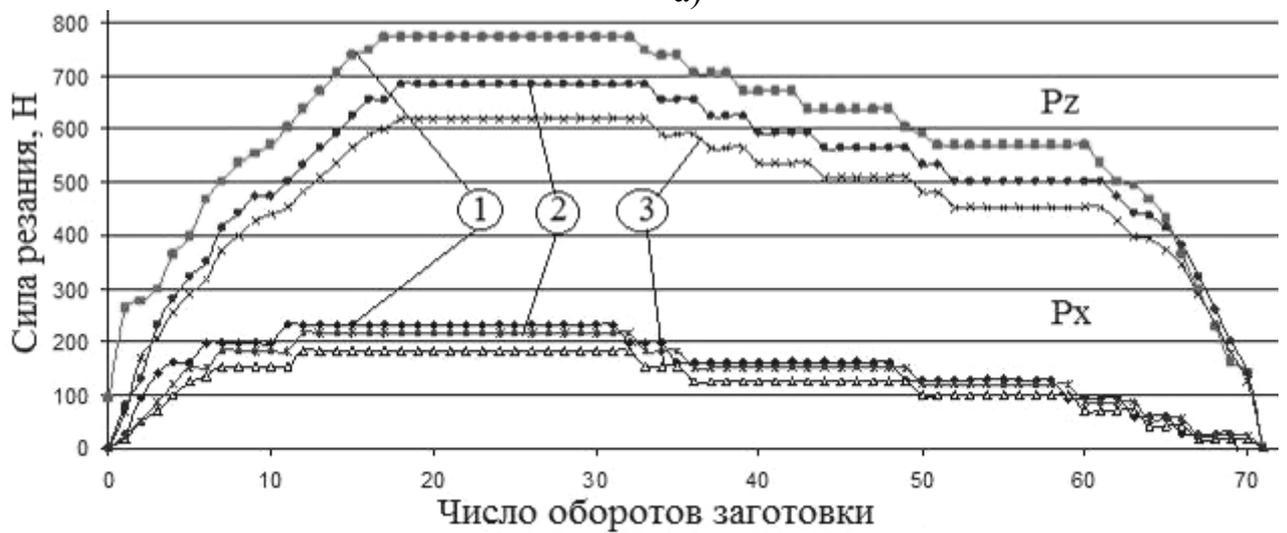
Рис. 4.4. Форма и вид стружки при различных режимах обработки:

а – подача 1 мм/об; б - подача 2 мм/об; в – подача 4 мм/об.

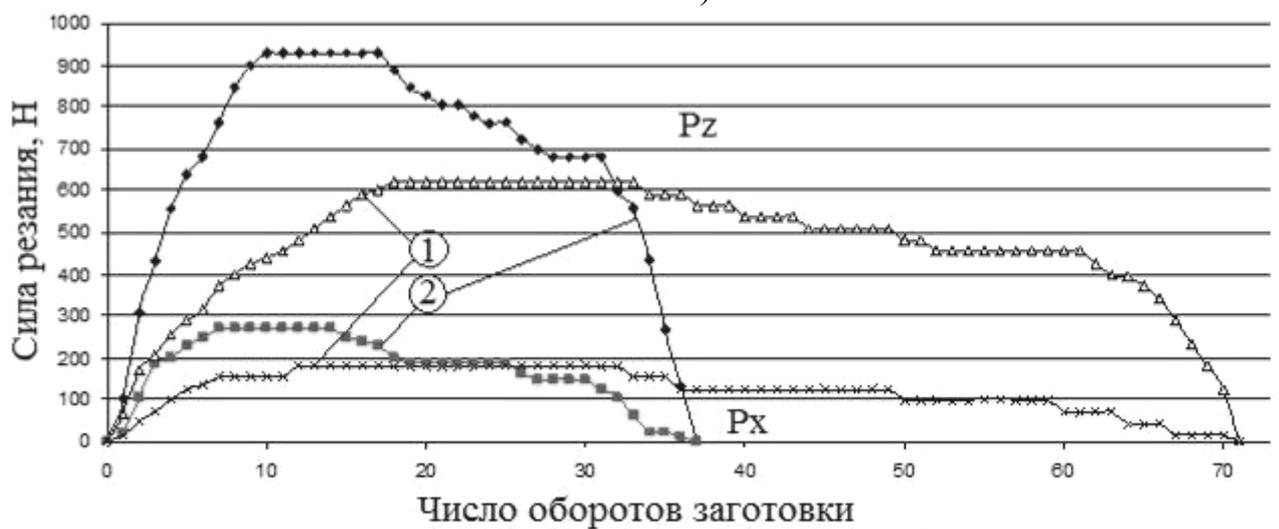
Графики на рисунке 4.5 иллюстрируют максимальные величины составляющих силы резания  $P_z$  и  $P_x$  на каждом обороте заготовки и являются средними значениями по результатам пяти опытов для каждой серии эксперимента. Так, на рис. 4.5, а представлено влияние подачи СОЖ (сульфофрезоло) в зону резания при обработке единичной впадины сборной червячной фрезой. Анализ графиков показывает, что величина составляющей силы резания  $P_z$  без подачи СОЖ составляет  $\approx 707$  Н, а  $P_x \approx 227$  Н. Во время подачи СОЖ в зону резания величины составляющих силы резания составили  $P_z \approx 596$  Н, а  $P_x \approx 159$  Н.



а)



б)



в)

Рис. 4.5. Составляющие силы резания при вырезании единичной впадины от:  
а – подачи СОЖ: 1 – без подачи СОЖ, 2 – при подаче СОЖ;  
б – переднего угла: 1 -  $0^\circ$ ; 2 -  $2,5^\circ$ ; 3 -  $5^\circ$ ; в – подачи: 1 – 1 мм/об, 2 – 2 мм/об

Графики являются обобщением результатов зубофрезерования образцов единичных впадин с использованием экспериментальной установки.

На основании проведенных экспериментальных исследований можно констатировать, что использование СОЖ уменьшает величину силы резания на 15,7 %. Это связано с тем, что СОЖ улучшает условия резания из-за снижения температуры в зоне обработки и удаления стружки.

При анализе графиков (см. рис. 4.5, б), иллюстрирующих усилия, возникающие при обработке единичной впадины, видно, что увеличение переднего угла  $\gamma_a$  с  $0^\circ$  до  $5^\circ$  позволяет уменьшить составляющие силы резания с  $P_z \approx 772 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 230 \text{ Н}$  до  $P_z \approx 684 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 214 \text{ Н}$  при  $\gamma_a = 2,5^\circ$  и  $P_z \approx 618 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 180 \text{ Н}$  при  $\gamma_a = 5^\circ$ . Использование червячной фрезы с положительным передним углом  $\gamma_a = 5^\circ$  позволяет уменьшить силу резания на 21%, т.к. улучшаются условия схода стружки.

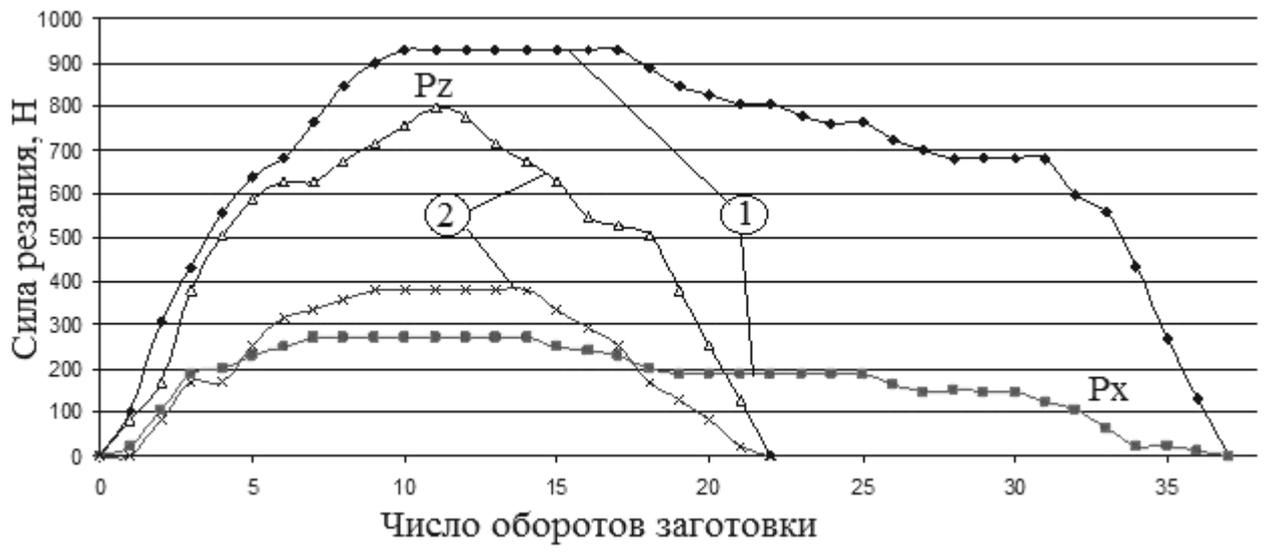
Из анализа графиков (см. рис 4.5, в) сделан вывод, что увеличение подачи с 1 до 2 мм/об увеличивает силу резания в среднем на 40%, при этом максимальные составляющие силы резания увеличились с  $P_z \approx 618 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 181 \text{ Н}$  до  $P_z \approx 928 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 274 \text{ Н}$ .

На рисунке 4.6 представлен график изменения силы резания при вырезании единичной впадины с подачей  $S_0 = 2 \text{ мм/об}$  у колес с модулем  $m = 2$  и  $m = 2,75 \text{ мм}$ . Из анализа графика видно, что с увеличением модуля с  $m = 2$  до  $m = 2,75 \text{ мм}$  увеличиваются и составляющие силы резания примерно на 16%.

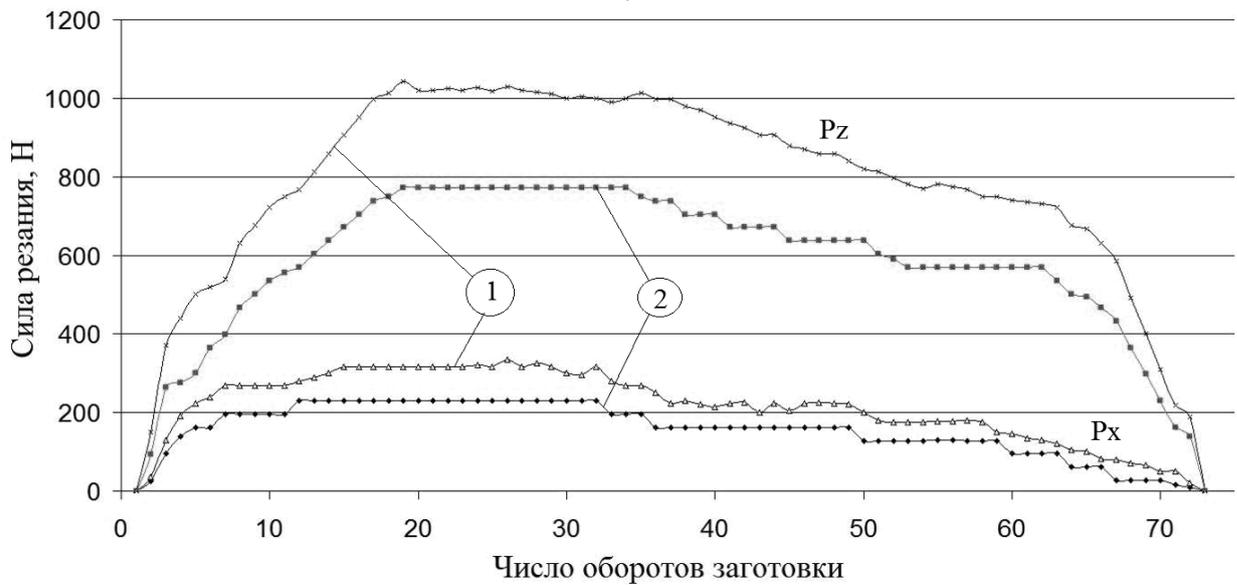
Также экспериментально проверялись силы резания при обработке заготовок червячными монолитными и сборными фрезами. Составляющие силы резания  $P_z$  и  $P_x$  при обработке монолитной червячной фрезой (см. рис. 4.6,б) больше на 26%.

Для силовых зависимостей, полученных при обработке партии экспериментальных образцов твердостью 230 – 350 НВ, установлено влияние каждого фактора (при проведении серии из пяти опытов). Графики построены по результатам исследования силовых зависимостей, полученных при обработке последнего

образца в партии. Выбор данного образца обусловлен тем, что инструмент уже прошел приработку, и, следовательно, силовые характеристики процесса, полученные при обработке данного образца, является характеристиками всей партии.



а)



б)

Рис. 4.6. Составляющие силы резания при вырезании единичной впадины:

а - составляющие силы резания в зависимости от модуля

при подаче  $S_0 = 2$  мм/об: 1 –  $m = 2$ ; 2 –  $m = 2.75$ ;

б – в зависимости от конструкции фрезы: 1 – монолитной, 2 – сборной

Графики (рис. 4.7), свидетельствуют о монотонном возрастании обеих составляющих силы резания ( $P_x, P_z$ ) при обработке зубчатого колеса. Доминирующим фактором в увеличении силы резания, является подача  $S_0$ . Учитывая полученные экспериментальные данные сделан вывод, что составляющие силы резания при нарезании колеса из цельной заготовки больше, чем при вырезании единичной впадины по (2.6)  $P_z$  в среднем в 2,5 и  $P_x$  в 2,3 раза (см.рис. 2.5).

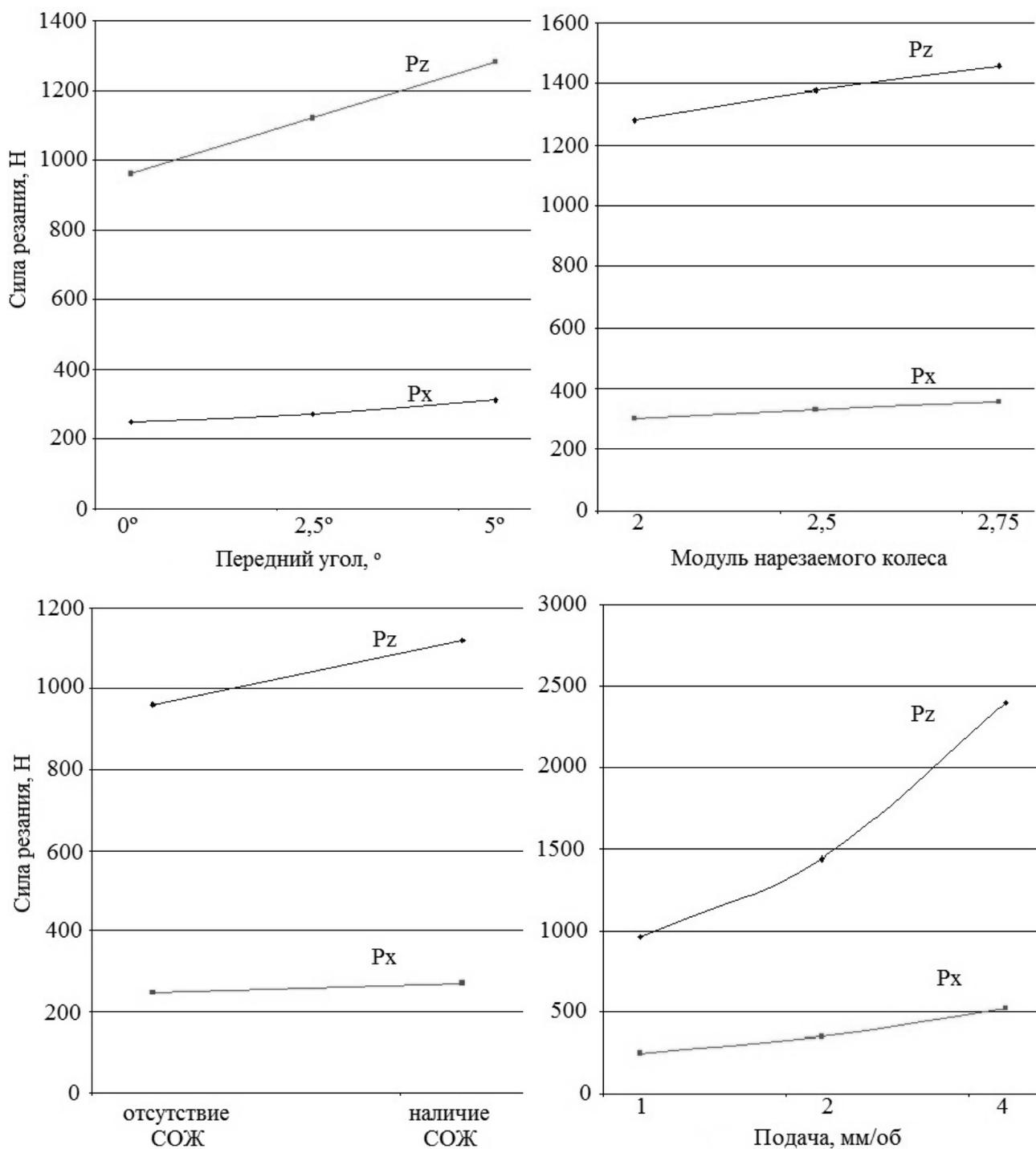


Рис. 4.7 – Влияние величины силы резания от различных условий зубофрезерования

## 4.2 Обработка экспериментальных данных

Обработка экспериментальных данных осуществлена на основе аппроксимационного алгоритма. Исходными данными являются величины составляющих силы резания при зубофрезеровании зубчатого колеса с учетом сложения единичных сил при вырезании единичной впадины по линии зацепления.

Рассмотрим аппроксимацию параметров функции  $P(S_0, \gamma_a, K_s, z_1, m, K_{нв})$ :

$$P(S_0, \gamma_a, K_s, z_1, m, K_{нв}) = C_{xz} \left( S_0^{\alpha_1} \cdot (C + \gamma_a)^{\alpha_2} \cdot z_1^{\alpha_3} \cdot m^{\alpha_4} \cdot K_{нв}^{\alpha_5} \cdot K_s \right), \quad (4.1)$$

При этом коэффициенты имеют следующие диапазоны значений:

- $C_{xz}, K_s \in (0; +\infty)$ ,
- $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5 \in (-\infty; +\infty)$ .

В качестве критерия оптимальности полученного решения будем использовать метод наименьших квадратов (OLS):

$$OLS = \sum_{i=1}^N \left( P_i^* - P_i(S_i, (C + \gamma_{ai}), K_{si}, z_{1i}, m_i, K_{нvi}) \right) \rightarrow \min, \quad (4.2)$$

где  $N$  – количество обрабатываемых экспериментальных данных;  $P_i^*$  – составляющая силы резания вдоль соответствующей оси, полученная в ходе  $i$ -го эксперимента;  $P_i(S_i, \gamma_{ai}, K_{si}, z_{1i}, m_i, K_{нvi})$  – рассчитанное значение силы резания для  $i$ -го эксперимента с использованием подбираемых коэффициентов  $C, C_{xz}, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, K_s, K_{нв}$ .

Коэффициент  $C_{xz}$  учитывает взаимодействие соседних зубьев рейки при формировании впадин зубчатого колеса.

Для автоматизации аппроксимации параметров функции  $P(S, \gamma_a, K_s, z_1, m, K_{нв})$  разработана программа на языке программирования «C#» с использованием Visual Studio 2015 Community Edition и библиотеки алгоритмов GeneticSharp (лицензия MIT). Фрагменты исходного кода программы аппроксимации приведены в приложении А. Вид главного окна интерфейса программы приведен на рисунке 4.8.

Главное окно программы состоит из трех элементов. Вверху расположено текстовое поле для вывода информации о работе программы и найденных решениях. В середине окна находится область настройки параметров. Внизу главного окна программы расположены три кнопки для работы с алгоритмом. Кнопка «Открыть» используется для загрузки данных о результатах проведенных экспериментов. При нажатии на кнопку появляется окно, в котором необходимо выбрать файл с исходными данными (рис. 4.8, б).

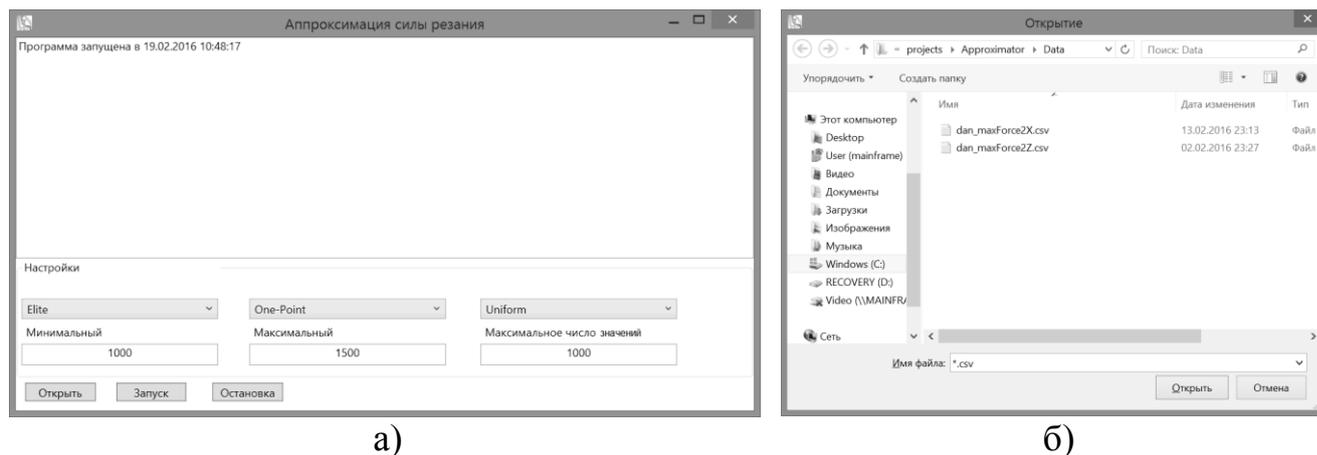


Рис. 4.8. Программа аппроксимации функции составляющих силы резания  
а – общий вид; б - диалоговое окно выбора исходных данных

Данные для работы программы аппроксимации хранятся в текстовых файлах формата «.CSV», после открытия которого и выбора параметров алгоритма, с помощью кнопки «Запуск» начинается процедура аппроксимации.

Аппроксимация выполнена в отдельном потоке, не блокируя интерфейс приложения. По мере нахождения новых решений они выводятся в текстовое поле наверху. При нахождении решения можно досрочно прервать работу алгоритма с помощью кнопки «Остановка». Работа программы приведена на рисунке 4.9.

С помощью разработанного программного обеспечения подобраны коэффициенты для определения величины силы резания при обработке зубчатого колеса. Были получены следующие зависимости:

$$P_x = 907,046 \left( S_0^{0,44} \cdot (71,086 + \gamma_a)^{-1,899} \cdot z_1^{-0,372} \cdot m^{-1,124} \cdot K_{нв}^{0,557} \cdot K_s \right), \quad (4.3)$$

где коэффициент  $K_s$  равен 996,948 при подаче сульфозрезола в зону резания и 1384,370 при сухом резании.

$$P_z = 596,060 \left( s_0^{0,55} \cdot (74,266 + \gamma_a)^{-0,845} \cdot z_1^{-0,952} \cdot m^{0,517} \cdot K_{HB}^{0,307} \cdot K_s \right), \quad (4.4)$$

где коэффициент  $K_s$  равен 742,065 при подаче сульфозрезола в зону резания и 838,765 при сухом резании.

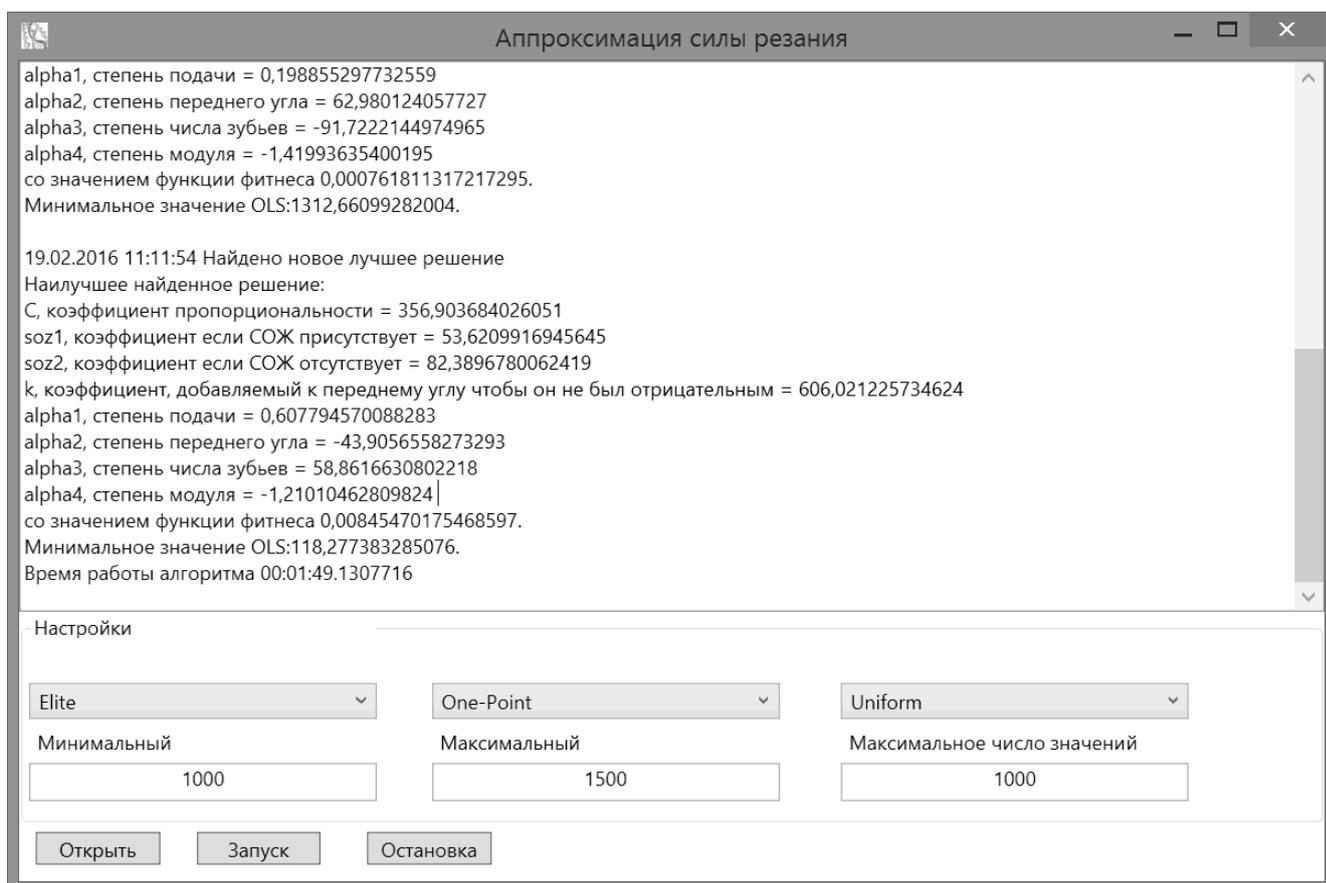


Рис. 4.9. Программа аппроксимации во время работы

Разница значений, рассчитанных по зависимостям (4.3 и 4.4) и полученных экспериментальным путем, не превышает 4 %. Сравнительный анализ результатов работ различных авторов представлен в таблице 4.6.

Таблица 4.6

#### Сравнение результатов исследований

по зависимостям (4.4) и (4.3)		по зависимостям Башкирова В.Н. [95]	
$P_x, H$	$P_z, H$	$P_x, H$	$P_z, H$
512	1182	433	1096

Для выбора рациональных значений режимов резания и определения мощности резания, которая с учетом мощности холостого хода станка и его КПД не должна превышать установленной мощности двигателя зубофрезерного станка, а зачастую должна быть меньше ее в 1,5—2 раза, необходимо знать величины силы резания. Из литературы по технологии обработки металлов резанием известны зависимости для оценки потребляемой мощности  $P_c$  в процессе фрезерования, например, от глубины фрезерования, скорости подачи и удельной силы резания:

$$P_c = \frac{a_p a_e v_f k_c}{60 \cdot 10^6}, \quad (4.5)$$

где  $a_p$  - глубина резания, мм;  $a_e$  - ширина фрезерования, мм;  $v_f$  - скорость подачи мм/мин;  $k_c$  - удельная сила резания Н/мм<sup>2</sup>.

Для чернового зубофрезерования монолитными червячными фрезами, изготовленными по ГОСТ 9324–80, затраченную мощность оборудования определяют по формуле [6]:

$$N = 0,12 m^{1,7} S_0^{0,9} \frac{V}{d_a}, \quad (4.6)$$

где  $m$  - модуль нарезаемого колеса, мм;  $S_0$  - осевая подача мм/об,  $V$  - скорость резания мм/мин,  $d_a$  - диаметр вершин инструмента, мм.

Мощность резания при обработке сборными червячными фрезами определена с использованием эмпирических зависимостей, учитывающих факторы, влияющие на потребляемую мощность, которые могут быть измерены в процессе зубообработки. Исходя из полученных в ходе проведения эксперимента данных, зависимость, для расчета затрачиваемой зубофрезерным станком мощности:

$$N = d_a \sqrt{P_x^2 + P_z^2} \cdot \sin(\alpha) \cdot n \frac{\pi}{60}, \quad (4.7)$$

где:  $\alpha_p = \arctg \frac{P_z}{P_x} + \frac{\pi}{2}$  (см. рис. 1.5).

Расчеты по формуле (4.7) представлены в таблице 4.7.

Пример расчета затрачиваемой мощности зубофрезерного станка

Исходные данные								Затрачиваемая мощность
$P_x, H$	$P_z, H$	$S_0, мм/об$	$z_1$	$n, об/мин$	$m$	$K_s$	$\gamma_a, ^\circ$	$N, KВт$
512	1182	2	112	104	2,75	50,01	5	~ 0,2

Процесс фрезерования сборными червячными фрезами характеризуется меньшей силой резания, чем при работе монолитными фрезами.

Оценка потребляемой мощности показывает, что необходимая мощность при зубофрезеровании сборными червячными фрезами в среднем на 40% ниже, чем при работе монолитными червячными фрезами, что подтверждено экспериментальными исследованиями.

Проверка адекватности модели также осуществлена экспериментальным путем. Вырезались впадины на заготовке, ширина которой соответствовала линии станочного зацепления (рис. 4.10). Установлено, что сила резания, при обработке колеса в среднем в ~2,52 больше чем при вырезании единичной впадины.

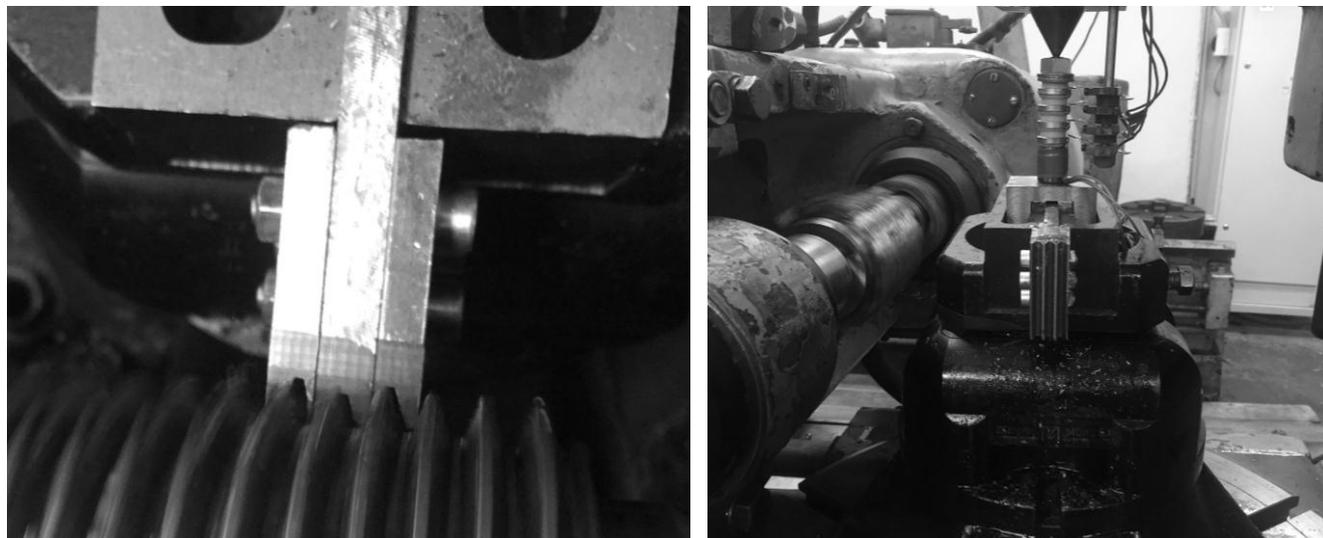


Рис. 4.10. Обработка заготовки, имитирующей целое колесо

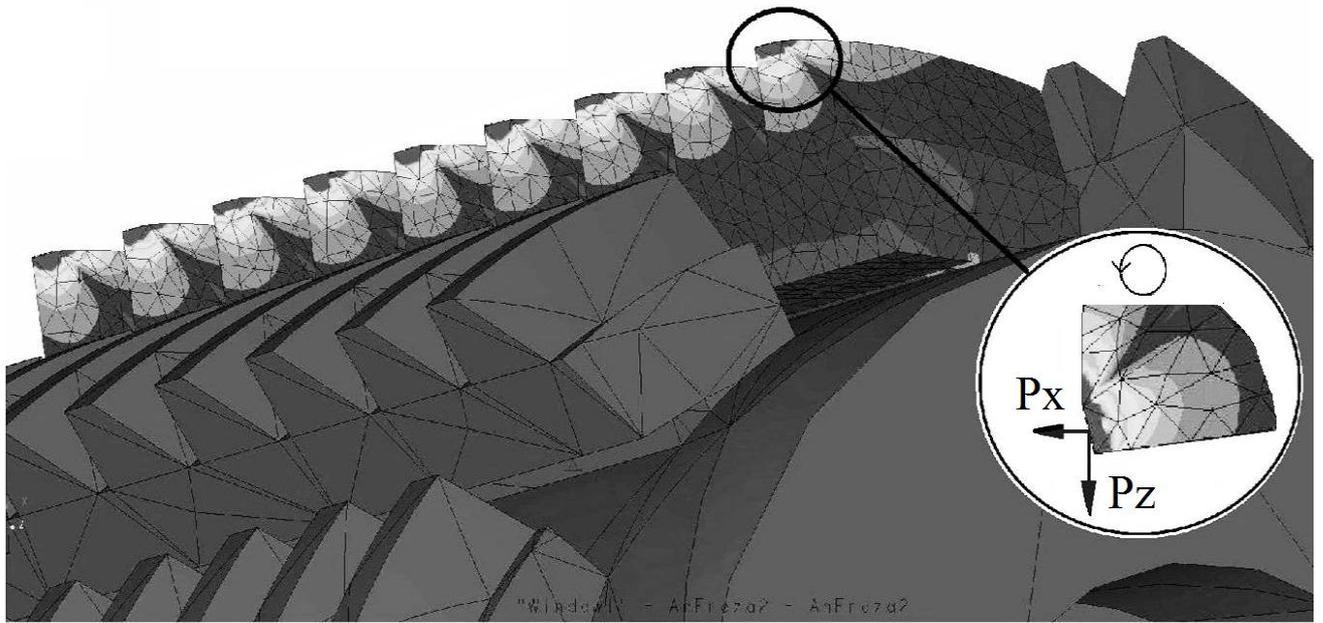
Предложенная модель сложения единичных сил резания, для определения общей силы резания дает результат в среднем на 6,3% больше чем в реальном процессе, что в целом подтверждает ее адекватность.

### 4.3 Моделирование износа сборной червячной фрезы

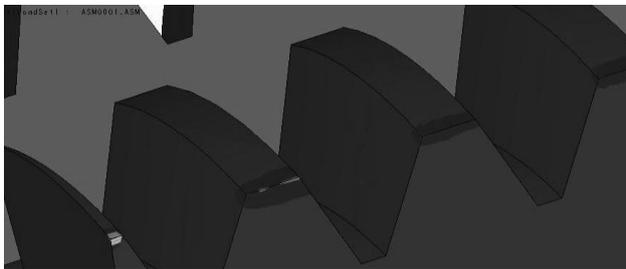
Для определения износостойкости, величины и характера износа зубьев сборной червячной фрезы необходимо нарезать большое число зубчатых колес, что не всегда является возможным из-за большого расхода металла, временных, финансовых затрат. На основе экспериментальных данных о нагрузке на режущие зубья за один оборот фрезы получена модель, позволяющая определить характер и величину износа ее задних поверхностей при различных режимах резания и условиях обработки. Для червячных фрез величина износа регламентируется ГОСТ 9324-80 и не должна превышать 0,3 мм для модулей  $m = 1 - 10$  мм.

Различают четыре вида изнашивания: адгезионное; диффузионное; окислительное; абразивное (характерное для инструментов из быстрорежущей стали; износ происходит в результате трения стружки о переднюю и заднюю поверхности в зоне резания).

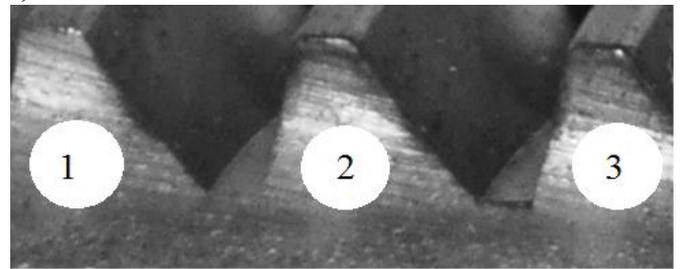
Износ зубьев червячной фрезы при нарезании зубчатого колеса зависит от конструкторских и технологических параметров, различен для разных зубьев, что связано с различной длительностью их участия в процессе резания и нагрузкой. Схема работы червячной фрезы характерна тем, что в работе одновременно участвуют несколько режущих поверхностей зуба. Каждый зуб червячной фрезы срезает определенный слой, т.е. в процессе работы зубья загружены неравномерно. Зубья, предварительно срезающие металл из впадины, нагружены значительно больше центральных, и поэтому они лимитируют увеличение продольной подачи. Наибольшее сечение срезаемого слоя приходится на вершинную режущую кромку. Боковые режущие кромки загружены также неравномерно: большую стружку срезает входящая кромка. Интенсивно изнашивается задняя поверхность выходящего зуба, несмотря на то, что толщина среза мала. Анализ распределения испытываемых нагрузок показал, что максимальную нагрузку воспринимает вершинная и входящая режущая кромки, и далее она распределяется вплоть до основания зуба. Результаты исследования представлены на рис. 4.11, а.



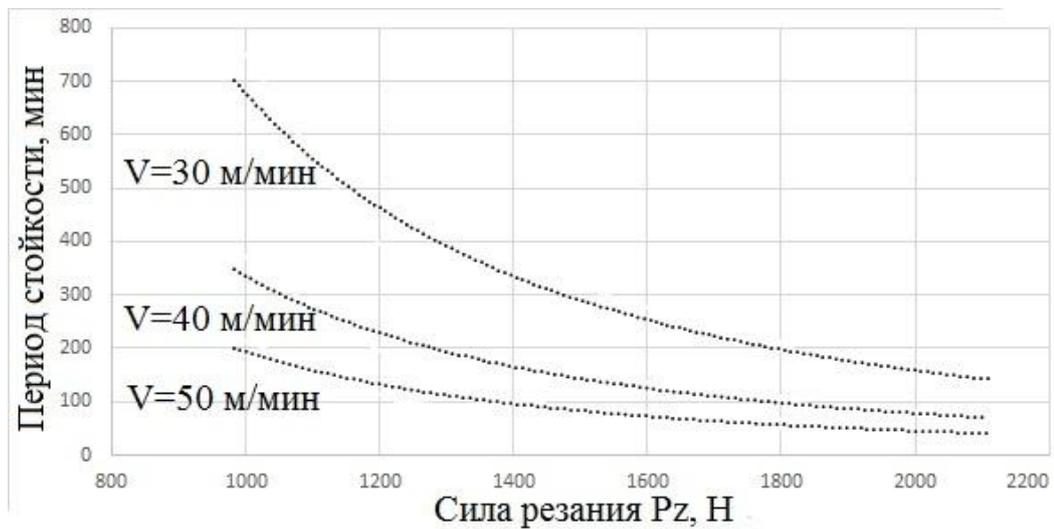
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.11. Исследование стойкости червячной фрезы:

а – распределение нагрузок на режущие элементы; б – прогнозирование износа; в – износ экспериментальной фрезы на 0,3 мм: 1 – выходящая режущая кромка, 2 – вершинная режущая кромка, 3 – входящая режущая кромка; г – графики зависимости стойкости фрезы от силы и скорости резания

На основе экспериментальных данных о нагрузке на режущие зубья фрезы выполнено моделирование, которое позволило прогнозировать величину износа задних поверхностей (см. рис. 4.11, б) и стойкости червячной фрезы (табл. 4.8), а на основе анализа полученных результатов построить график зависимости периода стойкости сборной червячной фрезы от силы резания (см. рис. 4.11, г). Анализ графиков показывает, что увеличение скорости резания при неизменной подаче приводит к уменьшению стойкости инструмента.

Таблица 4.8

Период стойкости фрезы

Стойкость стандартной фрезы, по ГОСТ 9324-80, не менее, <i>мин</i>	240		
Продольная подача <i>мм/об</i>	$S_0 = 1$	$S_0 = 2$	$S_0 = 3$
Стойкость фрезы экспериментальный, не менее, <i>мин</i>	708	334	204
Время обработки колеса, <i>мин</i>	635	317	211

Как видно из таблицы 4.8 повышать режимы резания бесконечно нельзя. Так при увеличении подачи до  $S_0 = 3 \text{ мм/об}$  мощности станка достаточно для резания, но стойкости фрезы уже не хватит для обработки колеса, поэтому на основе результатов моделирования целесообразным будет рекомендовать повысить подачу до  $S_0 = 2 \text{ мм/об}$ , при скорости резания от 30 до 35 *м/мин* чтобы уменьшить время операции зубофрезерования. Стоит отметить, что при этом будет обеспечена стойкость фрезы без передвижек и переточек достаточная для обработки целого колеса.

Моделирование выполнено в программном комплексе Creo Simulate, предусматривающем интеграцию конструкторских, технологических и аналитических программных подсистем в единую систему. Модули инженерного анализа Creo Simulate позволяют заменить дорогостоящие натурные эксперименты, требующие изготовления серии опытных образцов, машинными экспериментами над их виртуальными моделями. Главной особенностью аналитических модулей Creo Simulate является то, что они дают возможность создавать изделия с оптимальны-

ми весовыми, прочностными и иными параметрами, повышающими их эксплуатационные качества [53].

Использовались следующие возможности программы.

1. Статический анализ напряженно деформированных состояний конструкции фрез под воздействием различного типа нагрузок, учет контактных взаимодействий.

2. Модульный анализ конструкций, полностью закрепленных или обладающих степенями свободы зубчатых реек.

3. Расчет устойчивости, коэффициента запаса устойчивости и критической нагрузки.

4. Моделирование установившихся тепловых состояний конструкции при различных тепловых и силовых нагрузках и граничных условиях – заданных температурах и режимах конвекции.

5. Комплексный анализ конструкции.

Анализ схемы формирования впадины зубчатого колеса  $m = 2,75$  сборной червячной фрезой показал, что приближенно зубофрезерование можно заменить резбонарезанием с изменяемой глубиной резания, что позволяет проводить испытания на токарном станке с ЧПУ TOP-TURN CNC-S16(C). Шаг резьбы при этом, равен нормальному шагу исходной сборной червячной фрезы. Глубина резания программируется согласно величине срезаемого припуска при зубофрезеровании и в сумме равна высоте зуба колеса, нарезание которого имитируется. Учтено, что зуб изнашивается в  $z_0$  раз быстрее, чем при работе фрезы ( $z_0$  - число реек фрезы). Так величина износа по задней поверхности  $0,3$  мм достигнута за  $70$  мин работы (рис. 4.12). Режущий элемент резца представляет собой отрезанный на электроэрозионном станке фрагмент зубчатой рейки твердостью до  $57$  HRC. Для исследований использован комплект реек из отработавшей свой ресурс сборной червячной фрезы, перешлифованных по передней поверхности и с восстановленной геометрией. Преимуществом использования исходной рейки в качестве основы режущего элемента является то, что профиль, геометрия и технология его изготовления идентична изготовлению реек сборной червячной фрезы. Для ис-

следований разработана специальная конструкция резца. Резец состоит из двух частей: державки и прихвата. Прихват устанавливается в державку, поворачивается на угол подъема винтовой линии фрезы и фиксируется в заданном положении винтами и холодной сваркой. Державка представляет собой параллелепипед из стали 40X, закаленный до 43 HRC, со сторонами 16 мм, длиной 75 мм и отверстием для крепления прихвата. Габаритные размеры державки обусловлены параметрами резцедержателя имеющейся модели токарного станка. Прихват выполнен также из стали 40X и имеет трапецевидный паз для крепления режущего элемента и цилиндрический хвостовик. Установка и прижим режущего элемента осуществляется при помощи винта. Режимы резания выбраны с учетом сделанных ранее экспериментов на зубофрезерном станке.

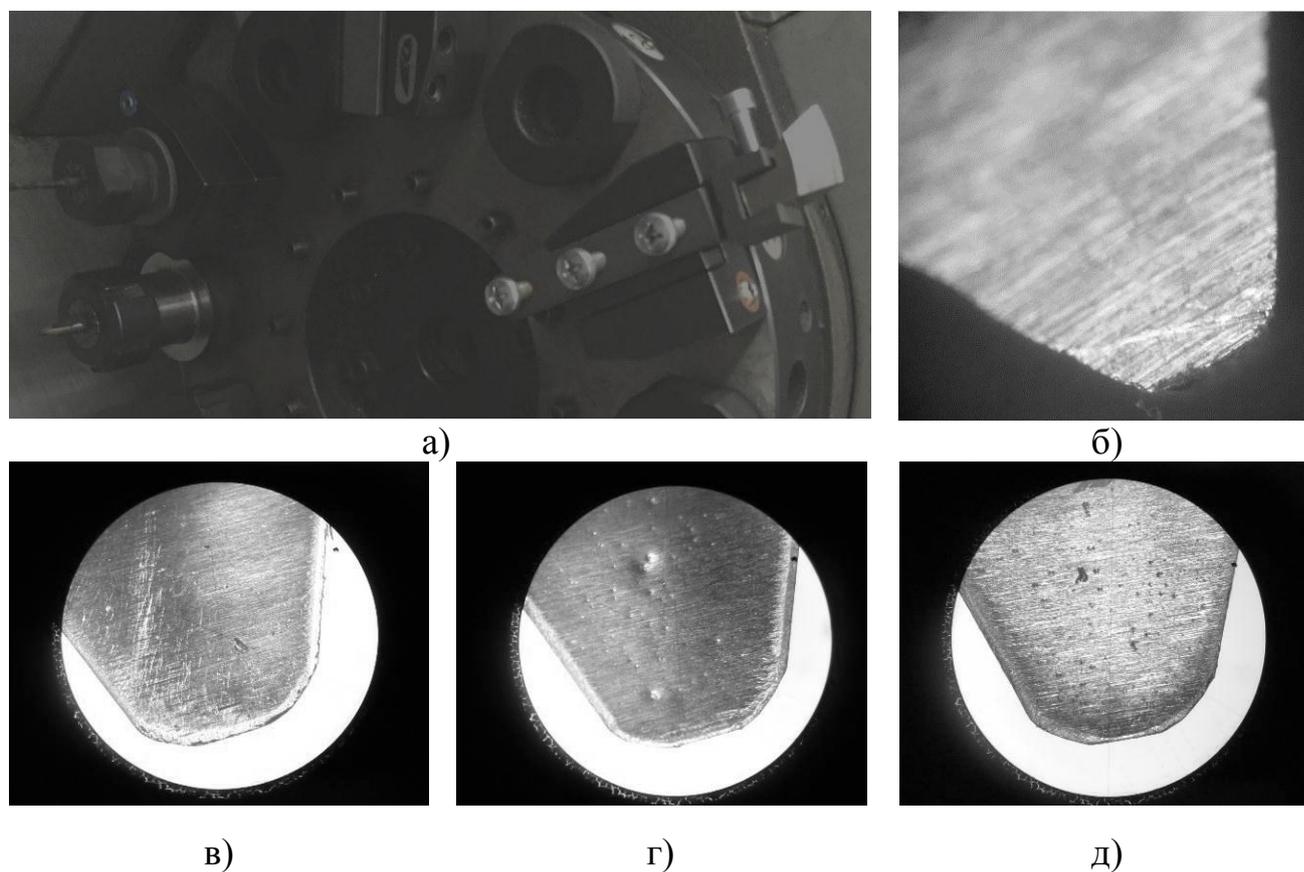


Рис. 4.12. Износ режущих поверхностей зубчатых реек экспериментальной червячной фрезы:

- а – резец для стойкостных испытаний; б – вершина изношенного зуба резца;  
 в – входящая режущая кромка фрезы; г – износ центрального зуба фрезы;  
 д - выходная режущая кромка фрезы

После резания, на зубьях рейки существует три четко выраженных участка износа (см. рис. 4.12, в - д): на входящей режущей кромке; на вершине; на выходящей режущей кромке фрезы.

Сила резания вызывает деформации механической части технологической системы, которые включают собственные деформации отдельных деталей системы, контактные деформации отдельных деталей и контактные деформации сопряженных поверхностей детали с инструментом.

#### 4.4 Точность нарезанных образцов

Целью исследования является обоснование возможности достижения необходимой точности цилиндрических зубчатых колес при зубофрезеровании сборными червячными фрезами. При нарезании как зубчатых колес, так и экспериментальных образцов (рис. 4.13) червячными фрезами на их точность оказывает влияние форма производящей поверхности, которая определяет точность зацепления зубчатых пар в кинематике и динамике. Однако, из-за необходимости обеспечения передних и задних углов резания, у инструментов сечение номинальной производящей поверхности приводит к образованию режущих кромок. В результате получается поверхность, на которой располагаются режущие кромки, не соответствующие номинальной винтовой. В таком случае необходимо заново определить новую производящую винтовую поверхность, или учесть влияние переточек на искажения производящей поверхности.

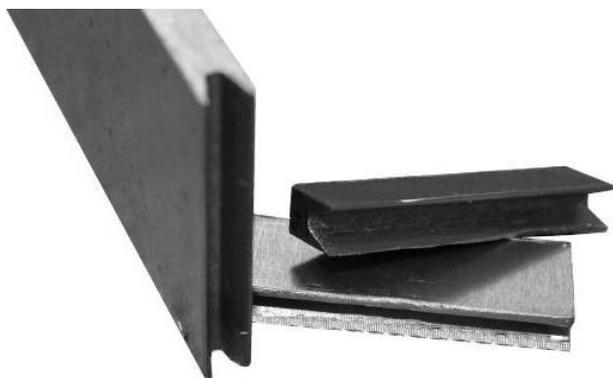


Рис. 4.13. Экспериментальные образцы

Для нарезания зубьев колес использованы новые и уже переточенные сборные червячные фрезы, спроектированные на основе эвольвентного червяка класса точности А с передними углами  $\gamma_a = 0^\circ$  и  $\gamma_a = 5^\circ$ . Исследование влияния геометрических пара-

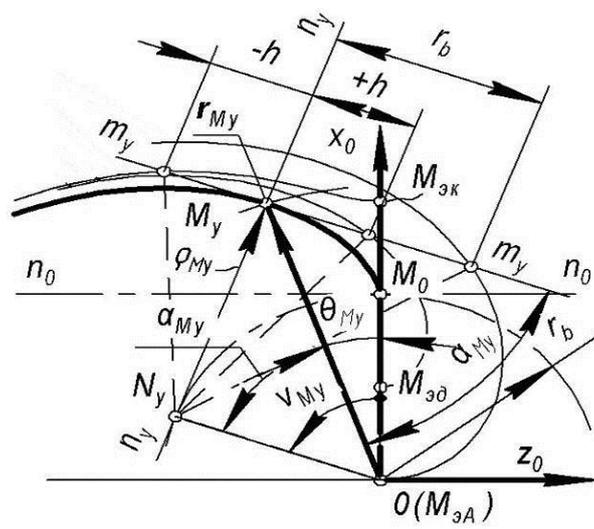
метров инструмента и переточек на профиль зубчатого прямозубого колеса, с модулем  $2,75 \text{ мм}$ , числом зубьев 112, коэффициентом смещения исходного контура  $x = 0$  и углом профиля исходного контура  $\alpha = 20^\circ$  реализовано (рис. 4.14, а) при графоаналитическом варианте и изготовлении зубчатых колес. Построение торцового профиля зубьев колеса осуществлено в системе Компас-3D, а необходимые расчеты проведены в математическом пакете Mathcad.

1. Определена система координат для торцового профиля зубчатого колеса и в соответствии с ней уравнение эвольвенты [11].

Эвольвентой является развертка основной окружности [11, 12] с радиусом  $r_b$  (рис. 4.14, б).



а)



б)

Рис. 4.14. Эвольвента окружности:

а – формообразование единичной впадины методом обкатки;

б – общий вид развертки окружности

Любая точка эвольвенты принадлежит прямой, касательной к основной окружности  $n - n$ , а предельная точка касания  $M_0$  принадлежит основной окружности. Касательная прямая при этом является производящей прямой. Точки  $M_0$ ,  $M_{эд}$ ,  $M_{эк}$ ,  $M_{эА}$ , связанные с производящей прямой  $n..n$  и расположенные вне ее, описывают удлиненную или укороченную эвольвенты.

В частном случае, когда расстояние от прямой  $n..n$  до предельной точки удлинённой эвольвенты равно  $r_b$ , т. е. предельная точка  $M_{эА}$  совпадает с центром основной окружности.

Рассмотрение произвольного положения производящей прямой, соответствующего положению точки  $M_y$  с радиус-вектором  $r_{My}$ , позволяет вывести уравнение эвольвенты в полярной и прямоугольной системах координат. В качестве полярной оси используем ось  $Oz_0$ .

Уравнение эвольвенты в прямоугольной системе координат инструмента

$$x_{My} = r_b (\cos v_{My} + v_{My} \sin v_{My}), \quad z_{My} = r_b (\sin v_{My} - v_{My} \cos v_{My}). \quad (4.8)$$

Общее уравнение спирали в прямоугольных координатах

$$\left. \begin{aligned} x_{My} &= r_b (\cos v_{My} + v_{My} \sin v_{My}) - h \cos v_{My}, \\ z_{My} &= r_b (\sin v_{My} - v_{My} \cos v_{My}) - h \sin v_{My}. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

Величину  $h$  необходимо подставлять со знаком «+» для удлинённой эвольвенты и со знаком «-» для укороченной эвольвенты.

2. Определены границы эвольвенты: начальная – предельная точка  $M_0$ , принадлежащая основной окружности; конечная – точка  $M_{1a}$ , принадлежащая окружности вершин зубьев колеса с углом развёрнутости эвольвенты  $v_{1a}$ .

3. Задано количество расчетных точек:  $n = 10$ , от  $n_1 = 0$  до  $n_{10} = 9$ . Точка  $n_1$  является предельной и лежит на оси  $O_1 X_1$ . Тогда количество интервалов  $n - 1 = 9$ .

4. Определен расчетный шаг по углу развёрнутости эвольвенты.

$$\Delta v_1 = v_{1a} / (n - 1) \quad (4.10)$$

5. В математическом пакете Mathcad рассчитаны и построены координаты точек правой и левой эвольвенты (рис 4.12, а).

По результатам расчетов сформирована таблица (табл. 4.9).

## Координаты эвольвенты в прямоугольной системе координат

Абсциссы точек правой эвольвенты				Абсциссы точек левой эвольвенты				Ординаты точек эвольвенты			
№	$X_r$	№	$X_r$	№	$X_l$	№	$X_l$	№	$Y$	№	$Y$
1	4.18	6	3.20	1	-4.18	6	-3.20	1	144.65	6	150.6
2	4.11	7	2.86	2	-4.11	7	-2.86	2	145.84	7	151.79
3	3.96	8	2.49	3	-3.96	8	-2.49	3	147.02	8	152.98
4	3.75	9	2.09	4	-3.75	9	-2.09	4	148.21	9	154.17
5	3.50	10	1.66	5	-3.50	10	-1.66	5	149.40	10	155.36

6. По расчетным точкам построены теоретическая правая и левая ветви эвольвенты в системе Компас – 3D (рис 4.15, б).

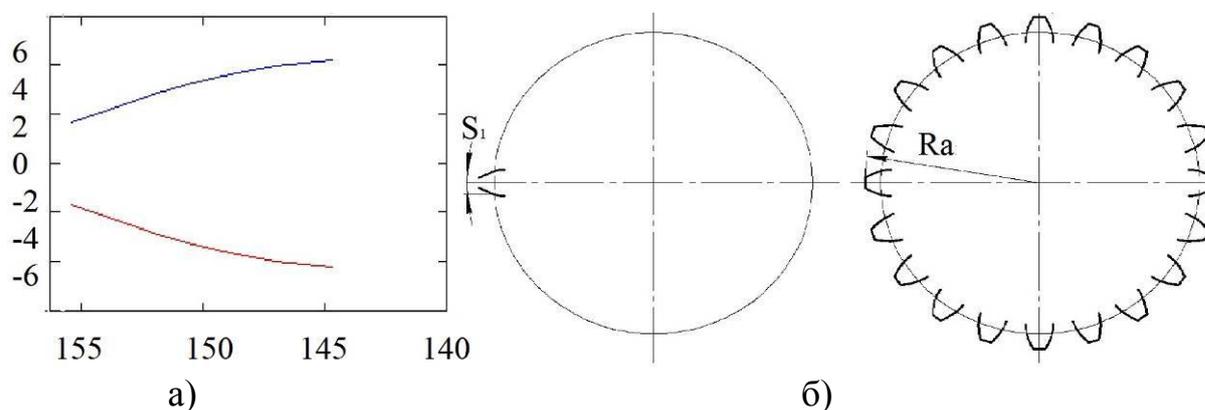


Рис. 4.15. Построение эвольвенты:

а – в пакете Mathcad; б – в графическом редакторе Компас – 3D

Винтовая производящая поверхность образует на детали не только рабочие, но и переходные поверхности, которые являются также винтовыми. Профиль впадины колеса не на всем ее протяжении является эвольвентным. У основания впадины всегда имеется неэвольвентная часть профиля, называемая галтелью. В зависимости от способа изготовления зубьев колеса галтель формируется: по окружности, по удлиненной и укороченной эвольвентам, по эпициклоиде, гипоциклоиде и более сложным кривым. Из указанного следует, что эвольвента окружности совместно с кривой, определяющей галтель впадины зуба, характери-

зует геометрию зуба колеса, а соответственно, геометрию передачи, составленной из таких колес, и производящую поверхность обрабатывающего их инструмента.

7. Измерены четыре варианта нарезанных фрагментов колес различными сборными червячными фрезами: с передним углом  $\gamma_a = 0^\circ$  без переточки (рис. 4.16, в); с передним углом  $\gamma_a = 0^\circ$  и переточкой на 6 мм (рис. 4.16, г); передний угол  $\gamma_a = 5^\circ$ , без переточки (рис. 4.16, д); с передним углом  $\gamma_a = 5^\circ$  и переточкой на 6 мм (рис. 4.16, е).

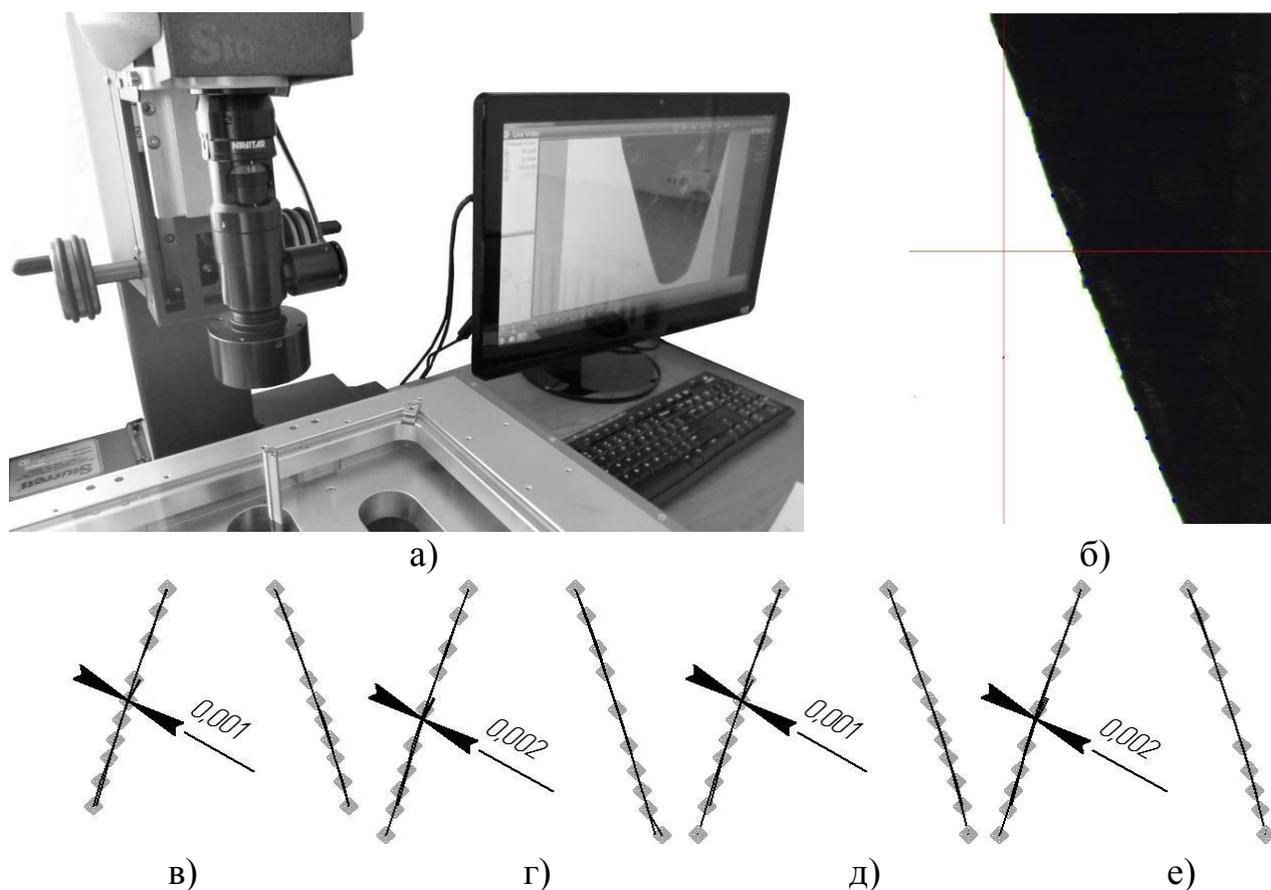


Рис. 4.16. Измерительная видеосистема Galileo:

а – общий вид; б – фрагмент окна рабочей программы;

сравнение теоретической эвольвенты и полученной при зубообработке:

в – передний угол  $0^\circ$ , без переточки; г - передний угол  $0^\circ$ , переточка на 6 мм;

д - передний угол  $5^\circ$ , без переточки; е - передний угол  $5^\circ$ , переточка на 6 мм

Образцы фрагментов зубчатых колес получены в результате вырезания единичной впадины при измерении силы резания на экспериментальной установ-

ке. Измерение производилось на измерительной видеосистеме серии Galileo MV 200, являющейся ручной измерительной системой с видеокамерой, предназначенной для измерений геометрических размеров с оптическим увеличением 6,5 : 1 в увеличениях от X12 до X30, разрешением 0,0005 мм (0,00002 ") и точностью по осям  $2,5 + 7L / 1000$ .

Для определения координат точек, расположенных на эвольвентном участке зуба, образец устанавливался и фиксировался на столе измерительной видеосистемы. Далее, при помощи накатных колец устанавливался оптический датчик на измеряемую поверхность. Точки, в которых измерялись координаты, вводились оператором на ПЭВМ при помощи клавиатуры и мыши. Результаты измерений сохранены в формате .ТХТ для дальнейшей обработки.

Изображение измеряемых образцов передано к подключенному внешнему моноблоку с плоским цветным ЖК – дисплеем 24" и установленным ПО для отображения измеряемого фрагмента зубчатого колеса.

8. В графическом пакете КОМПАС – 3D по измеренным координатам построены эвольвенты фрагментов нарезанных зубчатых колес.

Анализ полученных результатов показал, что зубофрезерование новыми фрезами с передними углами  $\gamma_a = 0^\circ, \gamma_a = 5^\circ$  и инструментом, работающим после переточки на 6 мм по передней поверхности, дает незначительное отклонения эвольвентных участков от теоретического профиля.

#### 4.5 Деформация поверхностных слоев зубьев нарезанных образцов

Для металлографических исследований использованы образцы впадин зубчатых колес, полученные в результате силовых испытаний на экспериментальной установке. Для оценки степени деформации в торцевом сечении зуба изготовлены шлифы. Приготовление металлографических шлифов включало в себя операции шлифования, механического полирования и химического травления 4% раствором азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  (рис. 4.17, а)

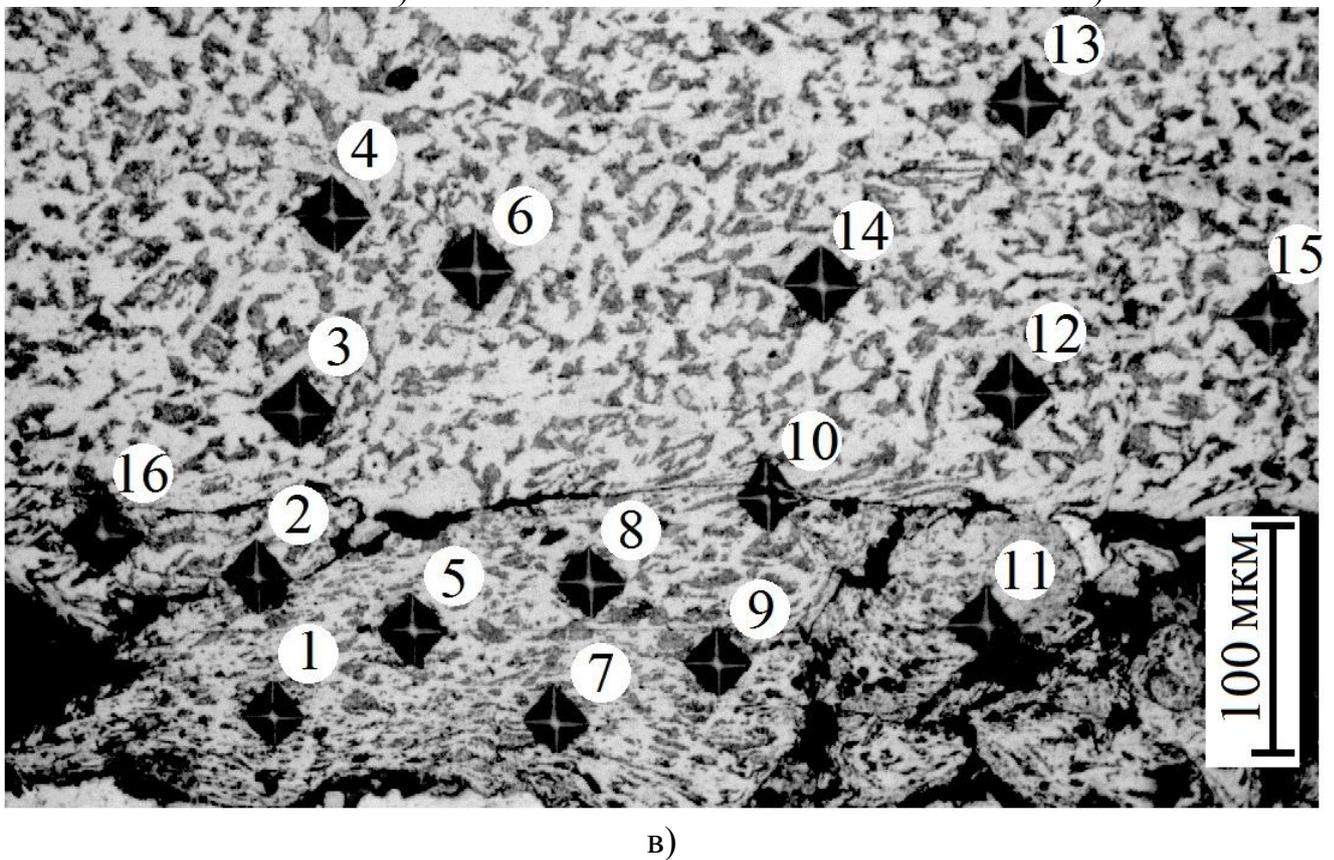
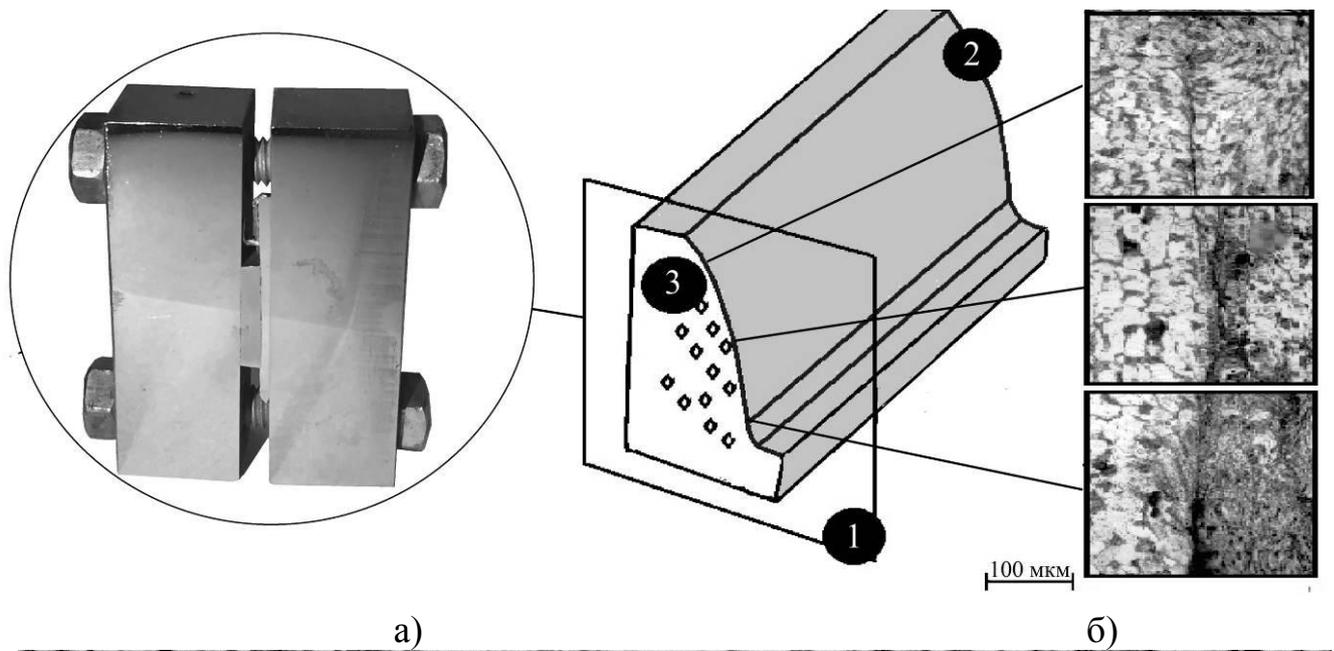


Рис. 4.17. Микроструктура боковых поверхностей зуба:  
 а – шлиф; б - схема исследования: 1 – торцевая плоскость зуба,  
 2 - исследуемый образец; 3 – общий вид схемы измерения микротвердости;  
 в - фото позиций измерения микротвердости

Исследование структуры металла проводилось на оптическом микроскопе *Axio Observer D1m* фирмы *Ziess* при увеличениях от  $\times 50$  до  $\times 500$  в светлом и темном полях. В рассматриваемых образцах наблюдалось два слоя (рис. 4.17, б): основной слой недеформированный в центре, представляющий собой равноосные зерна феритно-перлитной структуры и деформированный слой на поверхности образца, зернистая структура которого ориентирована в направлении подачи (встречной), что свидетельствует о локальных пластических деформациях, возникших во время зубофрезерования, которым подверглись образцы.

Процесс пластической деформации сопровождался выделением большого количества тепла, двояко влияющего на степень упрочнения поверхностного слоя. Во-первых, при высоких температурах происходит повышение пластичности металла, что способствует росту наклепа, во-вторых, происходит разупрочнение обработанной поверхности. Величина деформируемого слоя в диапазоне 71 - 120 мкм и различна по высоте зуба. Минимальная деформация поверхностного слоя наблюдались при формировании вершины зуба, где сила резания минимальна, далее она возросла от вершины к основанию зуба и максимальна по величине у переходной кривой.

Для оценки степени пластической деформации поверхностных слоев боковых сторон зубьев проведено измерение микротвердости на приборе ПМТ – 3 согласно ГОСТ 9450-76 с выдержкой 10 с и нагрузкой 100 гр.

Объектом измерения являлись фрагменты зубчатого колеса с модулем  $m = 2,75\text{мм}$  и числом зубьев  $z_1 = 112$ . Результаты измерений представлены в таблице 4.10.

Величина микротвердости определялась по формуле:

$$HV = \frac{1854 \cdot P_1}{[0,3 \cdot d_{cp}]^2}, \quad (4.11)$$

где  $P_1$  - нагрузка в граммах;  $d_{cp}$  - средний размер отпечатка.

Величина микротвердости в различных позициях, HV

№ позиции	$d_1, \text{мкм}$	$d_2, \text{мкм}$	$d_{\text{ср}}, \text{мкм}$	HV
1	90,5	96	93,25	236,9024
2	93,5	102,5	98	214,494
3	108,5	104	106,25	182,4775
4	112,5	112,5	112,5	162,7654
5	101,5	102,5	102	198,0008
6	114,5	113,5	114	158,5103
7	97	95	96	223,5243
8	101,5	102	101,75	198,9749
9	96,5	98,5	97,5	216,6995
10	103	94,5	98,75	211,2482
11	99,5	102	100,75	202,9444
12	117	115,5	116,25	152,4338
13	110,5	110	110,25	169,4767
14	110,5	115	112,75	162,0444
15	113,5	111	112,25	163,4913
16	120	114	117	150,4858

Изменений в микроструктуре быстрорежущей стали Р6М5, из которой изготовлены зубчатые рейки фрезы, после работы инструмента перед его первой переточкой, не выявлено (рис.4.18.)

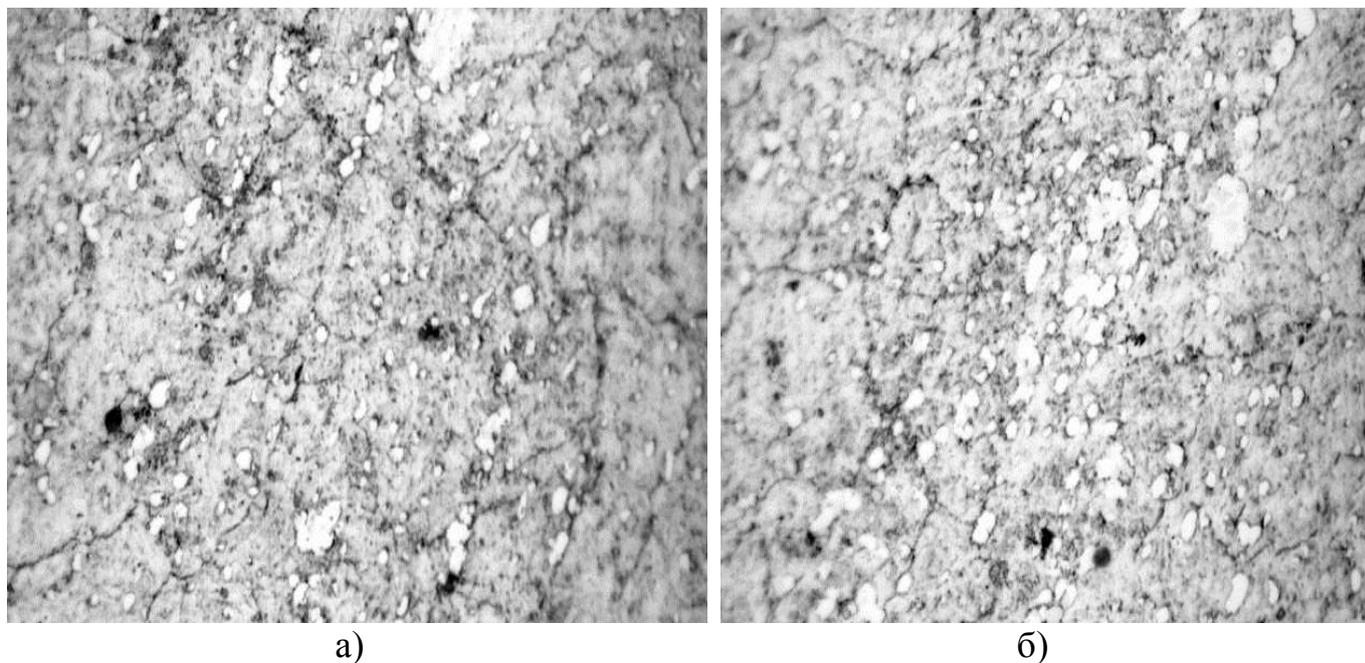


Рис. 4.18. Микроструктура стали Р6М5 на делительной окружности  
а – новой фрезы; б – после проведения серии экспериментов

Исследование пластических деформаций боковых поверхностей нарезанных зубчатых колес позволило в статическом положении определить микротвердость срезаемых слоев при зубофрезеровании.

#### 4.6 Микрогеометрия нарезанных образцов

Шероховатость боковых поверхностей зубчатых колес формируется под влиянием конструктивных параметров (модуля, числа зубьев и материала колеса, твердости материала заготовки и их физико-механических свойств) и технологических факторов (скорости и глубины резания, подачи и степени износа инструмента). Микрогеометрия неровностей связана с физико-механическими процессами разрушения металла при обработке резанием. Требования к шероховатости боковых поверхностей зуба устанавливаются в зависимости от служебного назначения зубчатых передач и определяются степенью точности колес (табл. 4.11).

Таблица 4.11

Соответствие степени точности зубчатого колеса и  $R_a$ , *мкм*

Степень точности	$R_a$ , <i>мкм</i>
8/-	(2,5—1,25)/—
7/8	(1,25—0,63)/(2,5—0,25)
6/7	(1,25—0,63)/(1,25—0,63)
5/6	(0,63—0,32)/(1,25—0,63)

По ГОСТ 1643—81 установлено 12 степеней точности зубчатых колес передач (в порядке убывания точности): 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12. Для 1 и 2-й степеней точности допуски и предельные отклонения не приводятся.

Из анализа таблицы 4.12 сделаны следующие выводы: для экспериментального инструмента изменение переднего угла с  $0^\circ$  до  $5^\circ$  снизило шероховатость боковых поверхностей зуба в 2,87 при измерении вдоль боковой поверхности зуба и в 1,1 раза при измерении поперек. По мере обработки экспериментальных образцов шероховатость поверхностей зубьев увеличивается.

Величины шероховатости  $R_a$ , мкм

№ образца	Схема измерения			
	Вдоль боковой поверхности зуба		Поперек боковой поверхности зуба	
	$\gamma_a = 5^\circ$ ,	$\gamma_a = 0^\circ$ ,	$\gamma_a = 5^\circ$ ,	$\gamma_a = 0^\circ$ ,
	$R_a$ , мкм	$R_a$ , мкм	$R_a$ , мкм	$R_a$ , мкм
1	0,17	0,43	0,76	0,81
2	0,17	0,45	0,76	0,83
3	0,17	0,54	0,76	0,84
4	0,19	0,57	0,77	0,86
5	0,21	0,57	0,77	0,86
6	0,24	0,58	0,78	0,91
7	0,24	0,86	0,78	0,91

Величина шероховатости (рис. 4.19) боковых поверхностей зубьев экспериментальных заготовок, нарезанных червячной фрезой, зависит от обрабатываемого материала, состояния инструмента и станка, смазочно-охлаждающей жидкости, режимов резания (главным образом от подачи) и модуля.

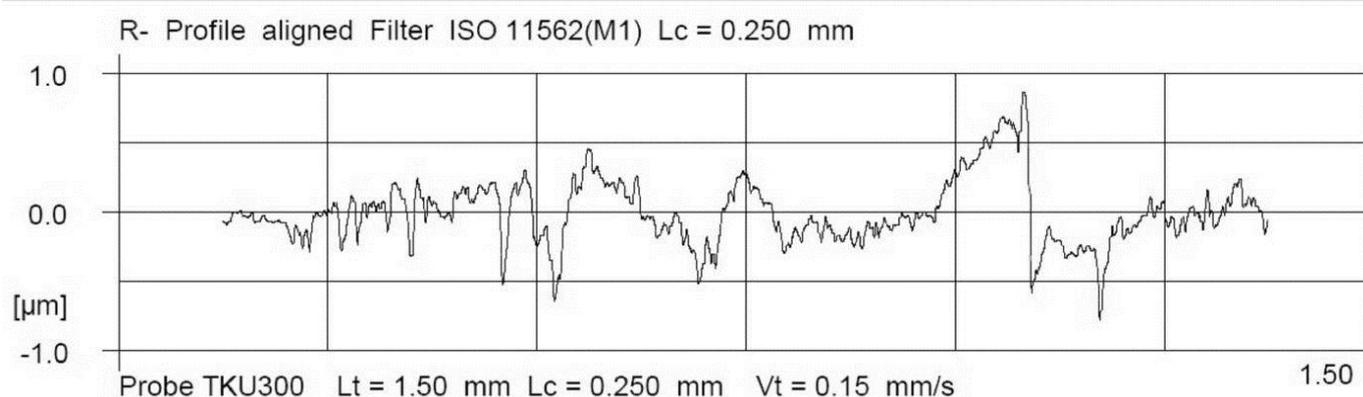


Рис. 4.19. Профилограмма шероховатости боковой поверхности зуба

При обработке червячными фрезами неизбежна огранка, возникающая в результате формирования боковых поверхностей зуба колеса рядом последовательных резов и волнистость с шагом, примерно равным подаче  $S_o$ . Волнистость оказывает влияние на контакт зубчатых колес больше, чем шероховатость обработанной поверхности и занимает промежуточное положение между отклонениями формы и шероховатостью поверхности. Стандарта волнистости нет, но есть

рекомендации ISO, согласно которым предусмотрено два параметра:  $S_w$  - шаг волнистости,  $W_z$  – высота волнистости.

Волнистость определяется по формуле [26]:

$$W_z = \frac{S_o^2}{4d_a \cdot \cos^2(\gamma_b)}, \quad (4.12)$$

где  $d_a$  - диаметр вершин инструмента,  $S_o$  - осевая подача,  $\gamma_b$  - угол наклона винтовой инструмента на делительном диаметре.

В качестве инструмента использована экспериментальная фреза с  $d_a = 110,4 \text{ мм}$ ,  $\gamma_a = 5^\circ$ ,  $m = 2,75 \text{ мм}$ , нарезающая впадину зубчатого колеса с числом зубьев  $z = 112$  на режиме резания  $S_o = 1 \text{ мм/об}$ ,  $V = 30 \text{ м/мин}$ .

Шероховатость и волнистость измерялись на приборе для контроля шероховатости, волнистости и профиля HOMMEL TESTER W55 (рис. 4.20, табл. 4.13).

Таблица 4.13

Технические характеристики прибора HOMMEL TESTER W55

Класс точности по DIN 4772	Класс 1
Измерительный диапазон/ разрешение	$\pm 8 \text{ мкм}/1 \text{ нм}$ $\pm 80 \text{ мкм}/10 \text{ нм}$ $\pm 400 \text{ мкм}/50 \text{ нм}$ $\pm 800 \text{ мкм}/100 \text{ нм}$
Механизмы подачи	LV16 — длина трассы 16 мм waveline 20 — длина трассы 20 мм waveline 60 — длина трассы 60 мм
Длина трассирования $l_t$	0.48; 1.5; 4.8; 15; 48 мм или выбирается в пределах 0.1—120 мм, в зависимости от механизма подачи
Отсечка шага (мм)	0.08; 0.25; 0.8; 2.5; 8.0
Статистика	n, x, S, R, max, min) для каждого из 1—999 измерений
Питание	100—240 В, 50—60 Гц, 160 ВА
Рабочая температура	от +10 °С до +45 °С, максимальная относительная влажность — 85%; $\Delta T 2 \text{ °С/ч}$
Температура хранения	от -20 °С до +50 °С

Результаты измерения сохранены на флэш-карте в формате .PDF. Эксплуатация прибора проводилась в реальных лабораторных условиях следующим образом: в специальном приспособлении на измерительном столе 2 прибора для контроля шероховатости 1 установлен и выставлен параллельно движению щупа экспериментальный образец 3, задается длина трассирования и шаг, далее в автоматическом режиме проводится измерение.

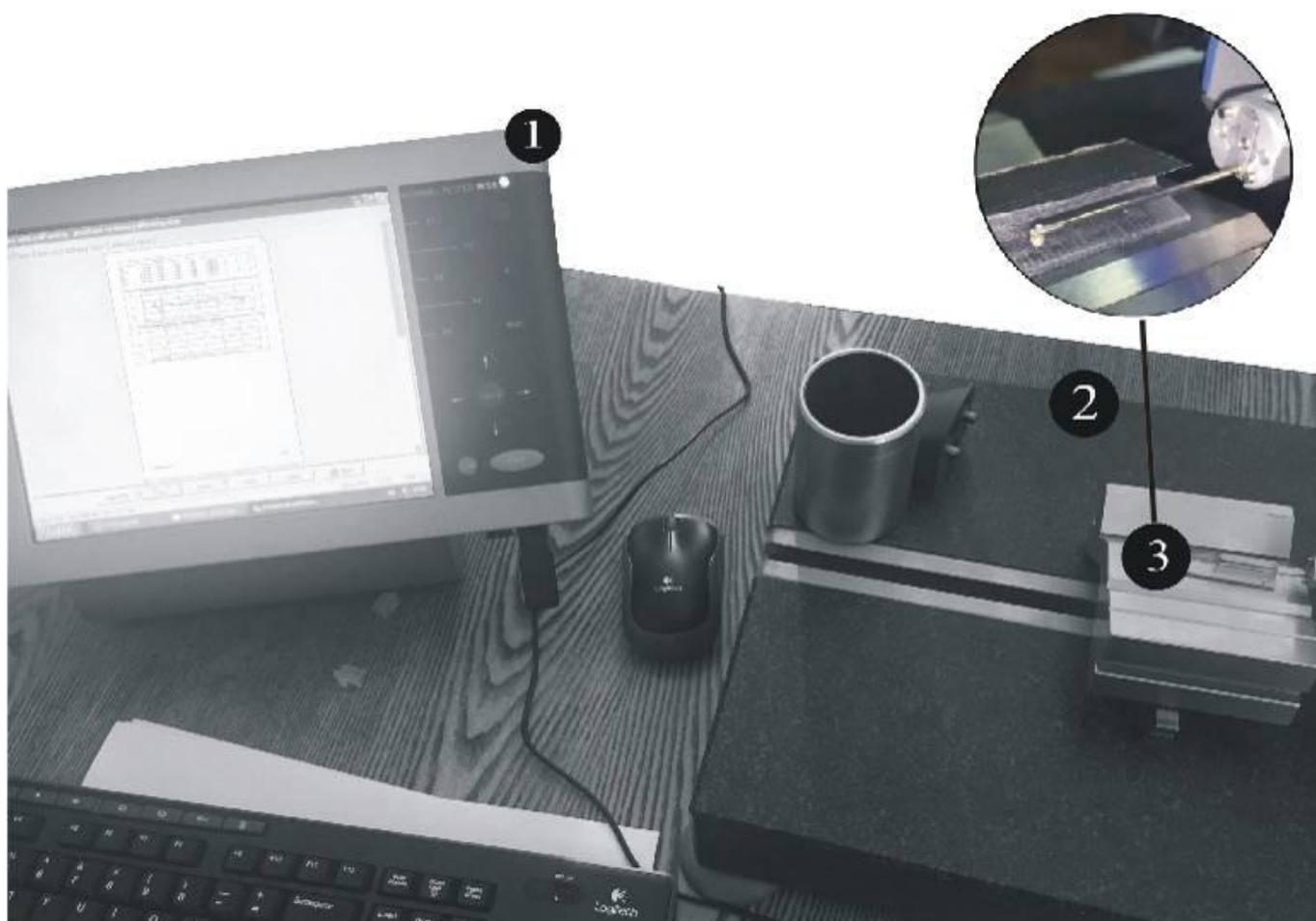
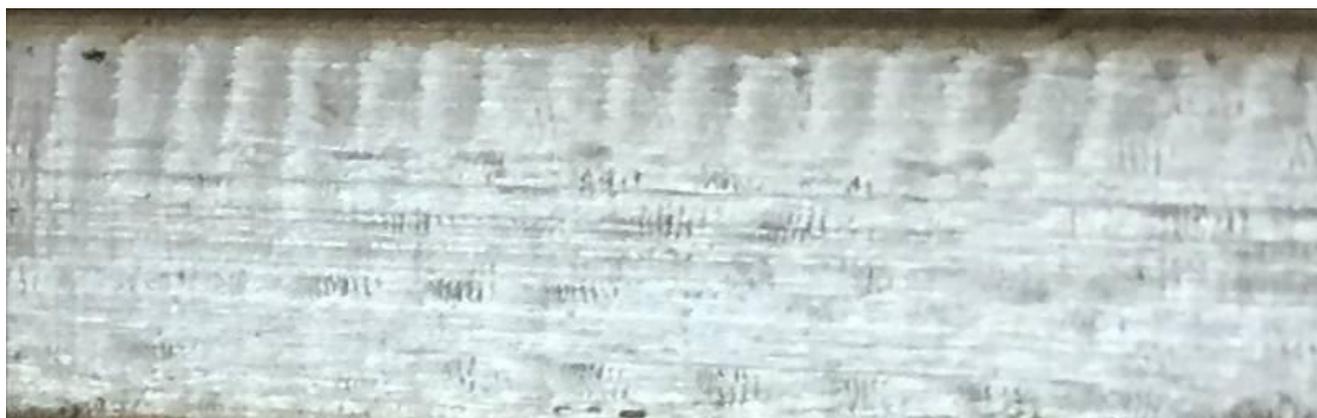


Рис. 4.20. Измерения шероховатости и волнистости боковой поверхности зубьев экспериментальных образцов:

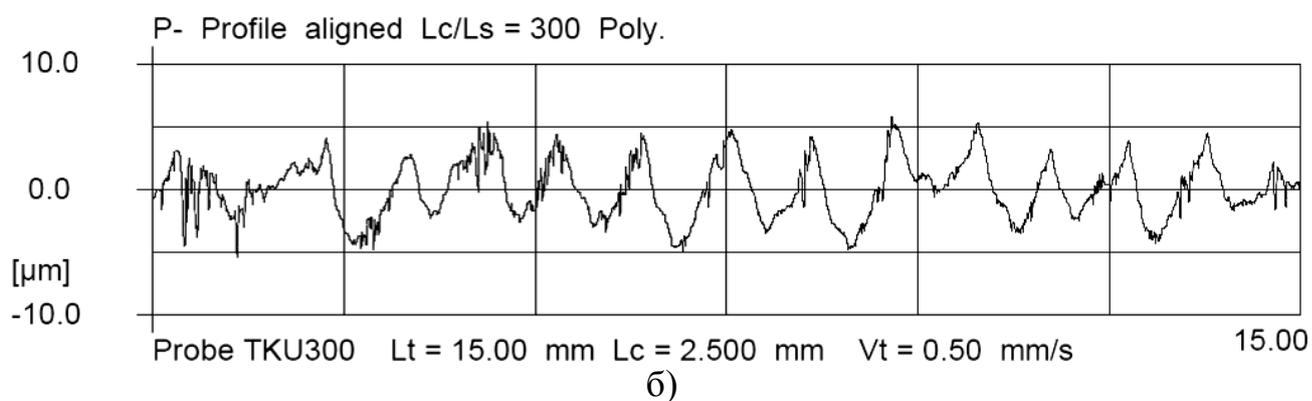
1 – прибор HOMMEL TESTER W55; 2 – измерительный столик;  
3 – исследуемые образцы

Для проведения исследований использованы образцы: с полной впадиной зубчатого колеса, разрезанной по дну впадины на две части, и единичный зуб (рис. 4.21). Теоретическая величина волнистости, рассчитанная по формуле (4.12), составляет 2,7 мкм. Измеренная волнистость составляет 2,79 мкм. Но при измере-

нии не учтен угол наклона винтовой на делительном диаметре. Замечено, что волнистость зависит от жесткости системы.



а)



б)

Рис. 4.21. Исследование волнистости:

а – фото волнистости боковой поверхности экспериментального образца зубчатого колеса, б – профилограмма волнистости боковой поверхности зуба

С уменьшением скорости резания происходит увеличение шероховатости из-за возможности образования наплывов. Также увеличение шероховатости происходит при обработке каждого последующего зубчатого колеса в партии. Увеличение переднего угла ведет к уменьшению силы резания, а, следовательно, и шероховатости из-за улучшений условия резания. Увеличение продольной подачи  $S_0$  увеличивает толщины срезаемых слоев, что приводит к росту силы резания при повышенном трении в зоне стружкообразования и увеличению волнистости. С увеличением силы резания происходит увеличение степени деформации металла в зоне резания, что так же вызывает рост фактической высоты микронеровностей.

## Выводы по 4 разделу

1. Установлено что при вырезании единичной впадины:

а) использование СОЖ уменьшает величину силы резания на 15,7 %. Например, величина составляющей силы резания  $P_z$  без подачи СОЖ составляет  $\approx 707 \text{ Н}$ , а  $P_x \approx 227 \text{ Н}$ . Во время подачи СОЖ в зону резания величины составляющих силы резания  $P_z \approx 596 \text{ Н}$ , а  $P_x \approx 159 \text{ Н}$ . На основании проведенных экспериментальных исследований можно констатировать, что использование СОЖ улучшают условия резания и снижают силу резания.

б) червячная фрезы с положительным передним углом  $\gamma_a = 5^\circ$  позволяет уменьшить силу резания на 11% по сравнению с фрезой без переднего угла. Так при переднем угле  $\gamma_a = 0^\circ$  составляющие силы резания  $P_z \approx 772 \text{ Н}$  и  $P_x \approx 230 \text{ Н}$ , а при  $\gamma_a = 2,5^\circ$  составляющие силы резания  $P_z \approx 684 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 214 \text{ Н}$ , и  $P_z \approx 618 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 180 \text{ Н}$  при переднем угле  $\gamma_a = 5^\circ$ .

в) увеличение подачи с 1 до 2 мм/об повышает силу резания в среднем на 40%. Максимальные составляющие силы резания  $P_z \approx 618 \text{ Н}$  и  $P_x \approx 181 \text{ Н}$  увеличились до  $P_z \approx 928 \text{ Н}$ ,  $P_x \approx 274 \text{ Н}$ .

г) составляющие силы резания при обработке монолитной червячной фрезой больше на 26 % чем при обработке сборной экспериментальной.

2. Получены зависимости, определяющие силы резания в зависимости от конструкторских и технологических параметров, как при нарезании единичной впадины, так и зубчатого колеса.

3. Установлено влияние силы резания при зубофрезеровании на величину деформации поверхностного слоя металла зубчатых колес. Величина деформируемого слоя в диапазоне 71 - 120 мкм и различна по высоте зуба. Микротвердость деформированных слоев в среднем на 23% больше чем недеформированных.

4. Установлено влияние величины износа инструмента по задней поверхности на точность и микрогеометрию боковых поверхностей зуба.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В работе решена актуальная научно-техническая задача теоретического и экспериментального обоснования рациональных геометрических параметров сборных червячных фрез и режимов резания, обеспечивающих требуемую стойкость червячной фрезы для нарезания крупногабаритных зубчатых венцов на заготовках из закаленной труднообрабатываемой стали. В процессе теоретических и экспериментальных исследований достигнуты следующие **основные результаты и сделаны выводы**.

1. Из анализа работ, выполненных как отечественными, так и зарубежными учеными, обоснована необходимость проведения дальнейших экспериментальных исследований на основе имитации обработки различных зубчатых колес, как сборными, так и монолитными червячными фрезами.

2. Установлено, что изменение задних кинематических углов резания на боковых сторонах влияет на точность сборной червячной фрезы с рациональными геометрическими параметрами при стачивании задних поверхностей, образованных по цилиндрической винтовой поверхности. Так при стачивании 6 мм с реек задние кинематические углы резания на боковых сторонах увеличиваются не более чем на 2% от исходной величины.

3. Анализ результатов геометрических моделей срезаемых слоев позволил обосновать определение силы резания как совокупности сил, соответствующих последовательному срезанию слоев вдоль линии зацепления.

4. Исследования, выполненные на экспериментальной установке, позволили определить величины составляющих силы резания, как при фрезеровании одной впадины, так и фрезеровании впадин между зубьями колеса, находящегося в станочном зацеплении с фрезой. Тарирование установки показало линейность ее характеристик. Анализ показателей уровня электрического шума при передаче сигнала от динамометра к USB-осциллографу установил, что уровень шума не превышает 20% от уровня полезного сигнала. Использование специальных образцов

для проведения экспериментальных исследований в виде пластин позволило исключить работу соседних зубьев реек в нескольких впадинах.

5. В результате исследования процесса зубофрезерования крупногабаритных цилиндрических зубчатых колес установлено влияние конструктивных параметров фрезы и режимов обработки на составляющие силы резания. Так, использование СОЖ уменьшает величину силы резания на 15,7 % по сравнению с зубофрезерованием без СОЖ; переход от фрезы с нулевым передним углом к фрезе с положительным передним углом  $\gamma_a = 5^\circ$  позволяет уменьшить силу резания на 11%; увеличение подачи с 1 до 2 мм/об приводит к росту силы резания в среднем на 40%, при этом составляющие силы резания подачи изменяются нелинейно;

6. На основе экспериментальных данных о силе резания, моделирование в программном комплексе Creo Simulate позволило рассчитать распределение нагрузки на инструмент и рекомендовать рациональные режимы резания для каждого конкретного колеса, а также выполнить прогнозирование стойкости, величины и характера износа червячной фрезы.

7. Предложенные рекомендации по назначению геометрических параметров сборных фрез и рациональных режимов резания использованы на ОАО «Станко-техника» и ОАО НПО «Сплав» при модернизации техпроцессов производства, что позволило уменьшить основное время зубофрезерования на 49%, повысить стойкость инструментов при зубофрезеровании крупногабаритных колес. Отдельные материалы научных исследований использованы в учебном процессе на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет».

## Библиографический список

1. ГОСТ 13678 – 73 Передатки зубчатые цилиндрические мелко модульные с часовым профилем. – Изд-во стандартов, 1973. – 15 с.
2. ГОСТ 16530 – 83 Передатки зубчатые. Термины, определения и обозначения. – Изд-во стандартов, 1987. – 49 с.
3. ГОСТ 16531 – 83 Передатки зубчатые цилиндрические. Термины, определения и обозначения. – Изд-во стандартов, 1987. – 25 с.
4. ГОСТ 19650 – 97 Передатки червячные цилиндрические. – Изд-во стандартов, 1987. – 10 с.
5. ГОСТ 9324-80 Фрезы червячные чистовые однозаходные для цилиндрических зубчатых колес с эвольвентным профилем. Технические условия. – Изд-во стандартов, 1987. – 50 с.
6. Адам Я.И. Силы резания и мощности при зубофрезеровании. Сб.: Исследования в области технологии обработки металлов резанием. - М.: Машгиз, 1957, кн. 82.
7. Адлер Ю.П. и др. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. - М.: Наука, 1971. - 283 с.
8. Баскаков Г.В. Определение усилий при фрезеровании прямозубых колес червячной фрезой. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - М.: Мосстанкин, 1954. - 19 с.
9. Башкиров В.Н. Разработка фильтра верхних частот с целью использования при исследовании динамики процесса резания при зубофрезеровании/Отчет, Коломенское СПО, инв. №0282.0077446, 1982. - 14 с.
10. Башкиров В.Н. Экспериментальное исследование составляющих сил резания при зубофрезеровании цилиндрических колес крупномодульными червячными фрезами/Отчет, Коломенское СПО, инв. №0283.0080588, 1982. - 170с.
11. Болотовский И. А. Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи внешнего зацепления. – М.: Машиностроение, 1974. – 160 с.

12. Выгодский М.Я. Справочник по высшей математике. - М.: Наука - 1977. – 872 с.
13. Гулида Э.Н. Измерение сил и крутящих моментов при зубофрезеровании. - Изд. Львовск. Гос. ун-та, 1966. - 134 с.
14. Догода М.И. Влияние сил резания на кинематическую точность зубофрезерного станка. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Одесса, 1970. - 24 с.
15. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
16. Литвин Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений. –М.: Наука, 1968. – 584 с.
17. Масленников Ф.П. Исследование процесса черного зубофрезерования прямозубых цилиндрических колес червячными фрезами с комплексным корригированием. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Свердловск, 1975. - 24 с.
18. Маслов В.Н. Исследование элементов динамики процесса зубофрезерования крупномодульной червячной фрезой. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Брянск, 1972. - 15 с.
19. Медведицков С.Н. Червячные фрезы с новыми схемами резания//Машиностроитель. 1966. – 6. – С. 16-17.
20. Медведицков С.Н., Нарожных Т.А., Скребнев Г.Г., Чурбаков В. Ф. Методика расчета параметров коррекции червячно-модульных фрез с прогрессивной схемой резания//Технология и автоматизация машиностроения. 1975, вып. 6. - С. 26-31.
21. Медведицков С.Н., Радзевич С.П., Смирнов Н.Н. Червячные фрезы с рациональными схемами резания//Машиностроитель. 1985. - 1. С. 22 – 24.
22. Николаев В.К. Сравнительное исследование попутного и встречного фрезерования прямозубых колес червячной фрезой. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Куйбышев, 1960. - 18 с.
23. Ничков А.Г. Исследование износа червячных модульных фрез методом моделирования процесса резания при черновом нарезании

цилиндрических прямозубых колес: Дис. ... канд. техн. наук/УПИ. - Свердловск, 1965. - 271 с.

24. Ничков А.Г. Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колес червячными фрезами: Дис. ... докт. техн. наук/УПИ - Свердловск, 1991. - 566 с

25. Орлов А.Д. Исследование силы резания, точности и чистоты поверхности зубьев цилиндрических колес, нарезанных червячными фрезами с различными схемами резания. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Волгоград, 1969. - 20 с.

26. Семенченко И.И. и др. Проектирование металлорежущих инструментов/ И.И. Семенченко, В.М. Матюшин, Г.Н. Сахаров – М.: машгиз, 1963. – 152 с.

27. Феофилов Н.Д. Системное проектирование зубофрезерования сборными червячными фрезами: Дис. ... докт. техн. наук/ ТулГУ. – Тула, 1999. – 394 с.

28. Чен-ДинЧан. Экспериментальное исследование сил резания при зубофрезеровании. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - М.: МВТУ им. Баумана, 1959. - 16 с.

29. Чурбаков В.Ф. Исследование силы резания, точности и чистоты поверхности профиля зубьев цилиндрических косозубых колес при зубофрезеровании червячно-модульными фрезами с прогрессивной схемой резания. Автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. - Волгоград, 1971.

30. A new approach to the analysis of high-speed. Gaetano Massimo Pittalà, Michele Monno. 2010, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 47, pp. 325–335.

31. A new method for determining the undeformed chip thickness in milling. H.Z. Li, K. Liu, X.P. Li. 1-3, 2001, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 113, pp. 378-384.

32. Agoston, M.A.: Computer Graphics an Geometric Modeling – Mathematics. Springer, London 2005
33. Albers, A ; u.a.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2. 5. Auflage, Springer, Berlin 2006
34. An analytical design method for milling cutters with nonconstant pitch to increase stability, part 2: Application. Budak, Erhan. 2003, Journal of manufacturing science and engineering, Vol. 125, pp. 35- 38.
35. Analytical simulation of milling: Influence of tool design on cutting forces. M. Fontaine, A. Devillez, D. Dudzinski. Besançon (France) : s.n., 2007. 12th IFToMM World Congress.
36. Boboulos, Miltiadis A. Manufacturing process and materials: exercise. s.l. : Ventus Publishing ApS, 2010.
37. Bouzakis, K. D. ; Kombogiannis, S. ; Antoniadis, A. ; Vidakis, N. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models. Journal of Manufacturing Science and Engineering 124 (2002) No. 1, pp. 42-51
38. Bouzakis, K.-D.; Lili, E.; Michailidis, N.; Friderikos, O.: Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. CIRP Annals - manufacturing Technology 57 (2008) No. 2, pp. 676-696
39. Claudin, C; Rech, J.: Development of a new rapid characterization method of hob's wear resistance in gear manufacturing. Journal of Materials Processing Technology 209 (2009) No. 11, pp. 5152-5160
40. Cooke D.A., Welbourn D.B. Forces in gear hobbing. - "Mach. and Product. Engng" 1. 1967, III, No. 2860, pp. 475-477; 2. 1968, 112, No. 2882, pp. 258-261.
41. Debb S.R., Bhattacharyya A. Forces in gear cutting. - J. Inst. Eng. (India). Mech. Eng. Div., 1971, 51, No. 5, Part 3, pp. 102-107. (ЭИ, Режущие инструменты, 1972, №33).
42. Detection of cutting forces in micro machining operations. J.P Wulfsberg, G Brudek. 2005. 5theuspen International Conference.

43. Detection of tooth breakage in end milling using machine tool axis control signals. C Johns, P W Prickett. 1999, Journal of Engineering Manufacture, Vol. 213, pp. 103-108 .
44. Dimitrou, V.; Antoniadis, A.: CAD-based simulation of the hobbing process for the manufacturing of spur and helical gears. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 41 (2009) No. 3-4, pp. 347-357
45. Gear hobbing cutting process simulation and tool wear prediction models. Bouzakis, K.-D. 2004, Journal of Manufacturing Science and Engineering , Vol. 124, pp. 42-51.
46. Grabon, Wieslaw. The automation of parameter PPQ identification process for profiles with functional properties. International book series of Inforamtion Science and Computing. pp. 198-202.
47. Modeling of Cutting Forces in End Milling Operations. Lai, Wen-Hsiang. 2000, Tamkang Journal of Science and Engineering, Vol. 3, pp. 15-22.
48. Reproducing wear mechanisms in gear hobbing—Evaluation of a single insert milling test. J. Gertha, M. Wernerb, M. Larssonc, U. Wiklunda. 12, 2009, Wear, Vol. 267, pp. 2257-2268.
49. Wear propagation of PVD AlCrN coated HSS hob in dry gear. Gertha, J. Ljubljana, Slovenia : s.n., 2007. European Conference on Tribology.
50. А.А. Маликов, Н.Д. Феофилов, А.В. Сидоркин, Е.С. Янов., Использование 3D-принтеров для прототипирования деталей изоляторов токосъемных узлов // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». Вып. 8: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 171 с. Ч. 1. С. 17-23.
51. Башкиров В.Н. Современное состояние расчета составляющих силы резания при зубофрезеровании цилиндрических колес червячными фрезами. – М.; 1986. – С. 48.
52. Башкиров В.Н. Экспериментальное исследование динамики процесса зубофрезерования крупномодульными червячными фрезами. - Станки и инструмент, 1984, №12, с. 18-20.

53. Н.Д. Феофилов, Е.С. Янов, Влияние силы резания на прочность и стойкость инструмента // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 217 с. С. 92-99.

54. Н.Д. Феофилов, Е.С. Янов, Контроль расположения и геометрических размеров элементов сборной червячной фрезы // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». Вып. 8: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 242 с. Ч. 2. С. 86-92.

55. Н.Д. Феофилов, И.А. Воробьев, Е.С. Янов, Исследование поверхностного слоя детали при зубофрезеровании сборными червячными фрезами // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». Вып. 10. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 217 с. С. 162-169.

56. Поморцев Л.С. Экспериментальное исследование сил резания при диагональном зубофрезеровании. - Изв. высш. учебных заведений, сер. Машиностроение, 1967, №1.

57. Скрябин В.Н., Тимофеев А.П., Феофилов Н.Д., Янов Е.С., Кинематика червячного зубофрезерования // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». Вып. 4: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 1. С. 58 – 68.

58. Смольников Н.Я., Скребнев Г.Г. Графоаналитический метод изучения процесса стружкообразования при зубофрезеровании червячными фрезами // Вестник забайкальского государственного университета. Вып. 3. Чита, 2008. С. 177-122.

59. Смольников Н.Я., Скребнев Г.Г., Григорова О.Л. Исследование влияния геометрических параметров зубчатого колеса и производящего контура на закономерности формирования переходных кривых зубьев в процессе зубофрезерования и зубодолбления методом математического моделирования // ВолгТУ. Вып. 3. Т. 1. Волгоград, 2007. С. 109-110.

60. Смольников Н.Я., Скребнев Г.Г. Стойкостные исследования червячных зуборезных фрез с закругленной вершиной зубьев. фрезами // Вестник забайкальского государственного университета. Вып. 4. Чита, 2006. С. 5-7.

61. Феофилов. Н.Д., Янов Е.С., Установка для проведения силовых исследований операции зубофрезерования // Известия ТулГУ. Сер. «Технические науки». Вып. 11: в 2 ч. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. Ч. 1. С. 184-189.
62. Шерышев В.И. Силовые и температурные зависимости при фрезеровании колес из жаропрочных и титановых сплавов. - Станки и инструмент, 1963, №2, с. 33-35.
63. Белгородский завод фрез [Электронный ресурс] // <http://belfrez.ru/>
64. Челябинский инструментальный завод [Электронный ресурс] // <http://chiz.ru/>.
65. Ижевский инструментальный завод [Электронный ресурс] // <http://iiz.ru/>.
66. Киржанский инструментальный завод [Электронный ресурс] // <http://oaokiz.ru/>.
67. Свердловский инструментальный завод [Электронный ресурс] // <http://siz66.ru/>.
68. Московский инструментальный завод [Электронный ресурс] <http://www.miz.ru/>.
69. Открытая электронная энциклопедия [Электронный ресурс] // [https://ru.wikipedia.org/wiki/тейлор\\_фред.ru](https://ru.wikipedia.org/wiki/тейлор_фред.ru).

## Приложение А

### Исходный код Chromosome.cs

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using GeneticSharp.Domain.Chromosomes;
using GeneticSharp.Domain.Randomizations;

namespace Approximator.Genetic
{
    /*
    Гены хромосомы
    0 - C, коэффициент пропорциональности, [0, +bsk)
    1 - soz1, коэффициент если СОЖ присутствует, [0, +bsk)
    2 - soz2, коэффициент если СОЖ отсутствует, [0, +bsk)
    3 - k, коэффициент, добавляемый к переднему углу чтобы он не был отрица-
    тельным, [0, +bsk)
    4 - alpha1, степень подачи, (-bsk, +bsk)
    5 - alpha2, степень переднего угла, (-bsk, +bsk)
    6 - alpha3, степень числа зубьев, (-bsk, +bsk)
    7 - alpha4, степень модуля, (-bsk, +bsk)
    */

    class MyChromosome : ChromosomeBase
    {
        public MyChromosome(int length)
        : base(length)
        {
            for (int i = 0; i < length; i++)
            {
                ReplaceGene(i, GenerateGene(i));
            }
        }

        public override IChromosome CreateNew()
        {
            return new MyChromosome(Length);
        }

        public override Gene GenerateGene(int geneIndex)
        {

```

```

double value = 0;
switch (geneIndex)
{
    case 0:
        value = RandomizationProvider.Current.GetDouble() * 500;
        break;
    case 1:
    case 2:
        value = RandomizationProvider.Current.GetDouble() * 100;
        break;
    case 3:
        value = RandomizationProvider.Current.GetDouble() * 1000;
        break;
    case 4:
    case 5:
    case 6:
    case 7:
        value = (RandomizationProvider.Current.GetDouble() - 0.5) * 200;
        break;
}
return new Gene(value);
}

public string info()
{
    string s = "";
    s += "C, коэффициент пропорциональности = " +
GetGene(0).Value.ToString() + "\n";
    s += "soz1, коэффициент если СОЖ присутствует = " +
GetGene(1).Value.ToString() + "\n";
    s += "soz2, коэффициент если СОЖ отсутствует = " +
GetGene(2).Value.ToString() + "\n";
    s += "k, коэффициент, добавляемый к переднему углу чтобы он не был от-
рицательным = " + GetGene(3).Value.ToString() + "\n";
    s += "alpha1, степень подачи = " + GetGene(4).Value.ToString() + "\n";
    s += "alpha2, степень переднего угла = " + GetGene(5).Value.ToString() +
"\n";
    s += "alpha3, степень числа зубьев = " + GetGene(6).Value.ToString() + "\n";
    s += "alpha4, степень модуля = " + GetGene(7).Value.ToString();
    return s;
}
}
}

```

### Исходный код Fitness.cs

```
using GeneticSharp.Domain.Fitnesses;
using GeneticSharp.Domain.Chromosomes;

namespace Approximator.Genetic
{
    class MyFitness : IFitness
    {
        public MyFitness(ref MyData newData)
        {
            this.data = newData;
        }

        private MyData data;

        public double Evaluate(ICHromosome chromosome)
        {
            //Суммируем интегральные оценки каждого элемента, хранящиеся в генах
            double result = this.data.OLS(chromosome);
            return result;
        }
    }
}
```

### Исходный код MyData.cs

```
using System;
using System.Collections.Generic;
using System.Linq;
using System.Text;
using System.Threading.Tasks;
using GeneticSharp.Domain.Chromosomes;

namespace Approximator
{
    struct DataStruct
    {
        public double P; // сила резания
        public double S; // подача
        public double gamma; // передний угол
        public bool soz; // наличие и отсутствие СОЖ
        public double m; //модуль
        public int z1; // число зубьев
    }
}
```

```

    }

class MyData
{
    public MyData()
    {
        minResult = Double.MaxValue;
    }

    private List<DataStruct> data;

    public double minResult;

    public void loadFile(string filename)
    {
        data = new List<DataStruct>();
        string[] lines = System.IO.File.ReadAllLines(filename);
        char[] separator = { ';' };
        foreach (string line in lines)
        {
            string[] values = line.Split(separator);
            DataStruct d = new DataStruct();
            try
            {
                d.P = double.Parse(values[0]);
                d.S = double.Parse(values[1]);
                d.gamma = double.Parse(values[2]);
                d.z1 = int.Parse(values[3]);
                d.m = double.Parse(values[4]);
                if (values[5] == "yes")
                    d.soz = true;
                else
                    d.soz = false;
            }
            catch
            {
                continue;
            }
            data.Add(d);
        }
    }

    public double OLS(IChromosome chromosome)
    {

```

```

double result = 0;

double C = (double)chromosome.GetGene(0).Value;
double soz1 = (double)chromosome.GetGene(1).Value;
double soz2 = (double)chromosome.GetGene(2).Value;
double k = (double)chromosome.GetGene(3).Value;
double alpha1 = (double)chromosome.GetGene(4).Value;
double alpha2 = (double)chromosome.GetGene(5).Value;
double alpha3 = (double)chromosome.GetGene(6).Value;
double alpha4 = (double)chromosome.GetGene(7).Value;

foreach (DataStruct d in data)
{
    double f;
    if (d.soz)
        f = C * (Math.Pow(d.S, alpha1) * Math.Pow(d.gamma + k, alpha2) * soz1
* Math.Pow(d.z1, alpha3) * Math.Pow(d.m, alpha4));
    else
        f = C * (Math.Pow(d.S, alpha1) * Math.Pow(d.gamma + k, alpha2) * soz2
* Math.Pow(d.z1, alpha3) * Math.Pow(d.m, alpha4));
    result += Math.Pow(d.P - f, 2);
}
result /= data.Count();

if (minResult > result)
{
    minResult = result;
}

return 1/result;
}
}
}

```





Акционерное общество  
«Научно-производственное объединение  
«СПЛАВ»

АО «НПО «СПЛАВ»

Юридический адрес: Щегловская засека, 33,  
г. Тула, 300004, Россия  
Телефон - (4872) 46-48-00, 46-45-86  
Факс - (4872) 46-44-00, 46-45-00  
E-mail: mail@splav.org  
ОГРН 1127154020311, ИНН 7105515987

В Диссертационный совет  
Д 212.271.01  
300012, г. Тула, пр. Ленина, 92

« 25 » 04 20 16 года № 1046/3066

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

### АКТ

**о практическом применении результатов диссертационного исследования  
Е.С. Янова на тему «Моделирование процесса зубофрезерования зубчатых  
колес сборными червячными фрезами на основе экспериментальных  
исследований»**

Настоящим Актом удостоверяется, что результаты диссертационного исследования Е.С. Янова на тему «Моделирование процесса зубофрезерования зубчатых колес сборными червячными фрезами на основе экспериментальных исследований» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были использованы для ремонта прессов и резбошлифовальных станков цехов №1 и №4 АО «НПО «СПЛАВ».

Начальник ОГМиЭ  
АО «НПО «СПЛАВ»



Коробенков В.М.