

**ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

УДК 621.81:519.8

**ШАЛЫЖИН КИРИЛЛ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЯМОБОЧНЫХ  
ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

по специальности 05.02.08  
«Технология машиностроения»

Могилев 2009

Работа выполнена в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Научный руководитель

**Жолобов Александр Алексеевич**

кандидат технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология  
машиностроения» ГУ ВПО «Белорусско-  
Российский университет», г. Могилев

Официальные оппоненты

**Акулович Леонид Михайлович**

доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры «Технология металлов»  
УО «Белорусский государственный  
аграрный технический университет», г.  
Минск

**Хатетовский Станислав Николаевич**

кандидат технических наук, доцент, доцент  
кафедры «Теоретическая механика»  
ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», г. Могилев

Оппонирующая организация

УО «Полоцкий государственный  
университет», г. Новополоцк

Защита состоится «16» октября 2009 г. в 14<sup>00</sup> на заседании Совета по защите диссертаций К 02.18.01 в Государственном учреждении высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет» по адресу: 212000, г. Могилев, пр-т Мира, 43, телефон ученого секретаря (222)-22-52-12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного учреждения высшего профессионального образования «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан «  » \_\_\_\_\_ 2009 г.

Ученый секретарь

Совета по защите диссертаций  
доктор физико-математических наук,  
профессор

В.И. Борисов

## **ВВЕДЕНИЕ**

Шлицевые соединения являются одним из основных видов соединений деталей машин. В общем машиностроении более 80 % шлицевых соединений имеют прямобочный шлицевый профиль, около половины которых применяются без закалки. Вопросам прогнозирования точности изготовления прямобочного шлицевого соединения посвящены исследования многих отечественных и зарубежных авторов. Эти исследования проводились по нескольким направлениям, в том числе по обеспечению геометрической точности шлицевой поверхности на этапах её изготовления, сборки, контроля. Недостатком данных исследований являлось отсутствие комплексного подхода, связывающего все указанные этапы производственного процесса. Применение такого подхода к исследованию позволяет полнее раскрыть существующие резервы повышения точности изготовления прямобочного шлицевого соединения. Поэтому настоящая диссертационная работа направлена на научное обоснование предлагаемых решений по обеспечению и повышению точности прямобочного шлицевого соединения, охватывающих процессы его изготовления, сборки и контроля. Актуальным при этом является высокоточный анализ координат точек шлицевой поверхности, позволяющий определить влияние режимов обработки, геометрических параметров и жёсткости технологической системы на точность изготовления шлицевой поверхности, а также произвести связь этих данных с точностью сборки соединения.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами.** Исследования по теме диссертации соответствуют приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2006 – 2010 годы, в частности разделу – “Компьютерное моделирование и испытание машин и механизмов” перечня, утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 512 от 17.05.2005. Диссертационная работа выполнялась в рамках госбюджетных тем ГБ–0619 “Создание интеллектуальных систем с адаптивными связями для управления качеством изделий машиностроения” и ГБ–064Ф “Создание динамических моделей контактного взаимодействия звеньев коническо-цилиндрической прецессионной передачи с разработкой на их основе способов снижения кинематической погрешности и вибрационных характеристик прецессионных редукторов”, при выполнении которых автор являлся исполнителем.

**Цель и задачи исследования.** Целью настоящей работы является обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых соединений на основе прогнозирования оптимальных параметров технологической системы посредством анализа и моделирования технологических процессов изготовления шлицевых поверхностей валов и сборки соединений.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых поверхностей валов за счёт оптимизации параметров технологической системы шлицефрезерования с учётом влияния режимов резания, геометрической точности и жесткости элементов технологической системы.

2. Обеспечение точности центрирования прямобочных шлицевых соединений путем оптимизации взаимного положения деталей при сборке с учётом погрешностей шлицевой поверхности вала.

3. Расширение функциональных возможностей контроля точности прямобочных шлицевых профилей и поверхностей на основе координатного метода моделирования.

4. Создание на основе проведенных исследований программного продукта для прогнозирования точности шлицефрезерования и внедрение его в производство и учебный процесс.

Объектом исследования являются технологические системы и процессы формирования прямобочных шлицевых поверхностей валов и сборки шлицевых соединений. В роли предмета исследований выступают технологические приёмы управления процессом обработки шлицевой поверхности вала, её контроля и сборки соединения для обеспечения параметров точности.

#### **Положения, выносимые на защиту.**

1. Методика прогнозирования точности формообразования прямобочной шлицевой поверхности червячной фрезой, отличающаяся комплексным учётом исходных данных о состоянии технологической системы и их изменений в процессе обработки, а также способом определения влияния погрешностей системы на точность формообразования шлицевого вала.

2. Методика определения собираемости прямобочного шлицевого соединения, отличающаяся учётом погрешностей шлицевых поверхностей валов, возникающих при изготовлении, и позволяющая установить оптимальные по точности центрирования взаимные положения вала и ступицы при сборке и эксплуатации под действием рабочей нагрузки.

3. Методика компенсации погрешностей функциональных поверхностей шлицевого соединения, позволяющая осуществлять расчёт их величин с обеспечением сохранения центрирования соединения.

4. Методика оценки точности шлицевых поверхностей на основе координатного метода моделирования, отличающаяся способом определения положения базовых элементов шлицевого профиля и поверхности, а также способом разделения суммарных погрешностей.

5. Способ реализации комплексного контроля шлицевого вала в приспособлении, расширяющем функциональные возможности контроля за счёт обеспечения одновременного измерения ширины шлица и отклонений профиля продольного сечения.

**Личный вклад соискателя.** Автором работы разработаны основные положения диссертации. Совместно с научным руководителем соискатель принимал участие в подготовке её основной идеи. Разработка приспособления для комплексного контроля шлицевого вала осуществлена совместно с научным руководителем и д-ром техн. наук., проф. М. Ф. Пашкевичем Являясь исполнителем, соискатель участвовал в выполнении НИР по теме диссертации.

**Апробация результатов диссертации.** Результаты диссертации докладывались на 40-й студенческой научно-технической конференции в Белорусско-Российском университете (2004 г.), на республиканских научно-технических конференциях аспирантов, магистрантов и студентов “Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности” в Белорусско-Российском университете (2004, 2005 гг.), на международных научно-технических конференциях ”Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии” в Белорусско-Российском университете (2007, 2009 гг.), на пятой межрегиональной научно-технической конференции студентов и аспирантов “Информационные технологии, энергетика и экономика” в филиале ГОУ ВПО “Московский энергетический институт (технический университет)” в Смоленске (2008 г.), на V международной научно-технической конференции “Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств” (2008г.), на VII международной научно-технической конференции ”Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин” в Новополоцке (2009 г.).

**Опубликованность результатов диссертации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 13 печатных работах, в том числе в четырёх статьях, включённых в перечень ВАК, пяти материалах международных научно-технических конференций, трёх сборниках тезисов докладов конференций. Кроме того, основные результаты диссертации включены в два отчёта по НИР, получен патент на полезную модель.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из титульного листа, оглавления, введения, общей характеристики работы, основной части, включающей 6 глав, заключения, библиографического списка, включающего список использованных источников из 120 наименований и список публикаций

соискателя из 13 наименований, 7 приложений. Диссертация содержит 124 страницы основного текста, 97 рисунков. Объём приложений – 34 страницы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении и общей характеристике работы** обоснована актуальность диссертационной работы, а также необходимость применения комплексного подхода при прогнозировании точности изготовления прямобочного шлицевого соединения, сформулированы цель и задачи исследований, даны общая характеристика работы и положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** проведен обзор литературных источников посвященных прогнозированию и технологическому обеспечению точности изготовления прямобочных шлицевых соединений. Определена необходимость осуществления дальнейших исследований посредством анализа, моделирования и оптимизации технологических процессов изготовления шлицевых поверхностей валов и сборки соединений.

В рамках указанного направления работы являются актуальными следующие задачи:

1. Обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых поверхностей валов. Актуальность этой задачи обосновывается отсутствием комплексной методики прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой.

2. Обеспечение точности центрирования прямобочных шлицевых соединений. Необходимость решения данной задачи обоснована отсутствием взаимосвязанной методики оценки собираемости шлицевого соединения.

3. Расширение функциональных возможностей контроля точности прямобочных шлицевых профилей и поверхностей на основе координатного метода моделирования. Упрощенный контроль шлицевой поверхности при высоких требованиях к связанной с ней функциональной поверхности не обеспечивает учёта ряда параметров, обуславливающих точность их взаимодействия. Поэтому задача создания эффективных способов и методик контроля шлицевой поверхности, обеспечивающих наряду с высокой производительностью комплексный учёт всех контролируемых параметров, является значимой и позволяет оценить фактическую точность шлицевого соединения на этапе его контроля.

**Вторая глава** посвящена разработке методики прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой. Для этой цели проанализирована силовая схема процесса шлицефрезерования, определены составляющие сил резания, действующие на инструмент и заготовку. Установлены зависимости, связывающие режимы резания и входные

параметры технологической системы с погрешностями формы, размеров и относительного положения обрабатываемой шлицевой поверхности вала. Входными параметрами технологической системы при этом являются: режимы резания, смещения посадочных гнёзд инструментальной оправки в сторону действия сил, жёсткости шпиндельного узла и задней бабки, крутильная податливость привода станка, жёсткости верхнего и нижнего гнезда инструментальной оправки, смещение оси задней бабки по вертикали и по горизонтали, стойкость фрезы, угол подъёма витка фрезы, длина и диаметр инструментальной оправки, величина и угол смещения центровых отверстий заготовки, её овальность и конусность. При осуществлении расчётов по разработанной методике учитываются влияния упругих деформаций заготовки и шпиндельного узла, инструментальной оправки и её посадочных гнёзд.

Прогиб заготовки под действием сил резания в точках их приложения был определён как для балки, установленной на двух опорах, с учётом изменения её жесткости в процессе формообразования шлицев по формулам:

$$\Delta_{zx} = \frac{P_x \cdot L_0^2 \cdot (L - L_0)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot I_0 \cdot L^2} (I L_0 + I_0 (L - L_0)), \quad (1)$$

$$\Delta_{zy} = \frac{P_y \cdot L_0^2 \cdot (L - L_0)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot I_0 \cdot L^2} (I L_0 + I_0 (L - L_0)), \quad (2)$$

где  $P_y$  – радиальная составляющая силы резания, направленная к оси заготовки, параллельно её торцу;

$P_x$  – составляющая силы резания, направленная перпендикулярно оси нарезаемого вала;

$L$  – длина вала;

$L_0, I_0$  – длина и осевой момент инерции шлицевого участка вала;

$I$  – осевой момент инерции круглого профиля вала;

$E$  – модуль упругости.

Схема деформации заготовки, закреплённой в центрах под действием сил резания  $P_x$  и  $P_y$  представлена на рисунке 1.

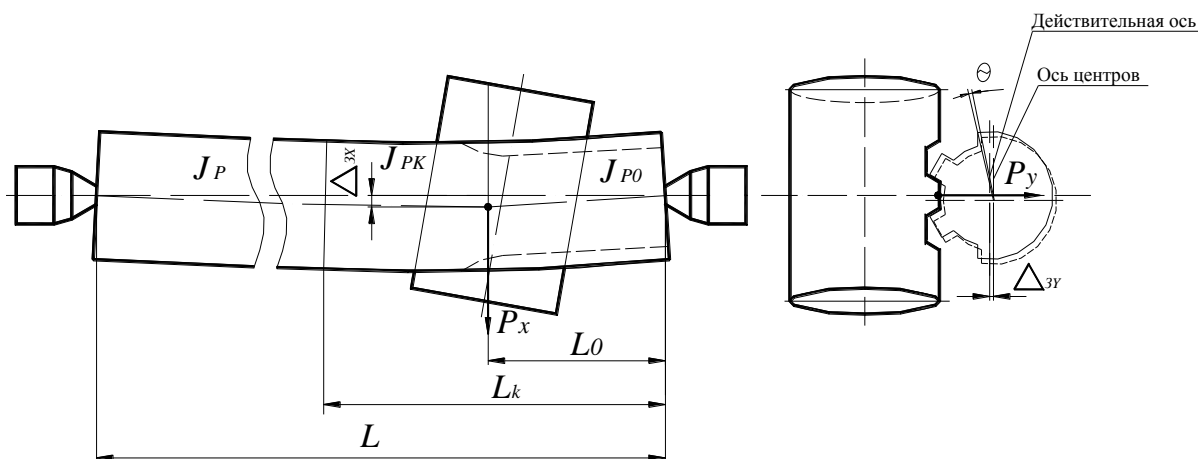


Рисунок 1 – Схема деформации заготовки

Касательная сила  $P_x$ , действующая на заготовку, вызывает её угловую деформацию. Относительные углы закручивания каждой точки шлицевой поверхности определяются по формуле

$$\theta = \theta_3 + \theta_c, \quad (3)$$

где  $\theta_3$  – составляющая угла закручивания, связанная с податливостью заготовки;

$\theta_c$  – составляющая угла закручивания, связанная с податливостью цепи обката и привода шлицефрезерного станка.

Составляющая  $\theta_3$  определяется по формуле

$$\theta_3 = \frac{M}{2G} \left( \frac{(L_K - L_0)^2}{J_{PK}} + \frac{(L - L_K)^2}{J_P} \right), \quad (4)$$

где  $M$  - крутящий момент, вызванный силой  $P_x$ ;

$G$  – модуль упругости второго рода;

$L_K$  - длина участка вала, подлежащего шлицефрезерованию;

$J_{PK}$  - полярный момент инерции участка вала, подлежащего шлицефрезерованию;

$J_P$  - полярный момент инерции круглого профиля вала.

Составляющая  $\theta_c$  определяется по формуле

$$\theta_c = Me_c, \quad (5)$$

где  $e_c$  - крутильная податливость цепи обката и привода шлицефрезерного станка.

Для оценки воздействия каждого входного параметра на точность формообразования шлицевого профиля в любом поперечном сечении вала введена система отсчёта, в качестве которой в настоящей работе выбрана декартова прямоугольная система координат OXYZ. Её ориентация в рабочем пространстве формообразования первоначально определена для идеального, а затем для реального случая формообразования шлицев. В идеальном случае в условиях абсолютной жёсткости технологической системы и при полном отсутствии каких-либо погрешностей её элементов ось заготовки и траектория перемещения червячной фрезы представляют собой прямые, строго параллельные друг другу. При этом червячная фреза формирует в каждом поперечном сечении вала точный шлицевый профиль. Координатная ось Z выбранной системы координат совмещается с осью заготовки, при этом ось заготовки и траектория перемещения червячной фрезы пересекают



координатную плоскость  $XOY$  в определённых точках. Начало системы координат совмещается с точкой  $O_3$  пересечения осью заготовки координатной плоскости  $XOY$ , а ось  $Y$  направляется через точку  $O_\Phi$  пересечения траектории фрезы с плоскостью  $XOY$  (рисунок 2).

Точки  $O_3$  и  $O_\Phi$  определяются как начала локальных систем координат соответственно заготовки и фрезы, относительно которых будут отсчитываться их текущие положения и ориентации с учетом погрешностей реальных условий работы технологической системы. Относительно локальной системы координат фрезы определяются положения самой фрезы и её условной передней поверхности, которая формирует в пространстве идеальный шлицевый профиль, центр которого совпадает с осью заготовки.

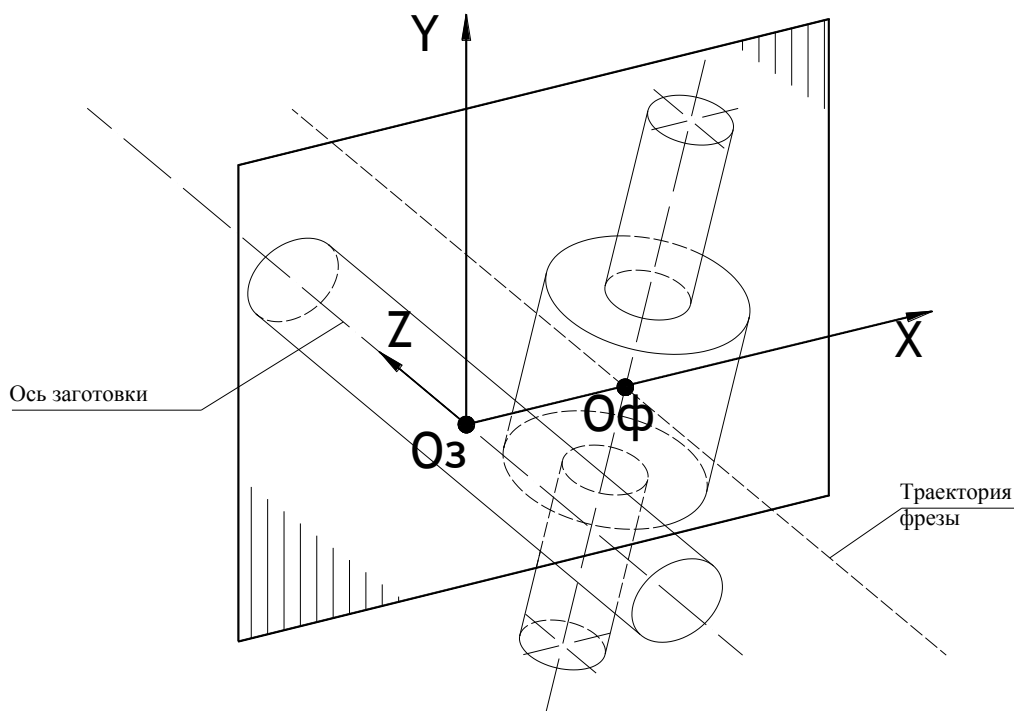


Рисунок 2 – Расположение системы отсчёта

Для количественной оценки влияния указанных входных параметров на точность формообразования шлицевого профиля в реальных условиях использовано построение его кусочно-непрерывной функции

$$R = \begin{cases} \frac{d}{2}, & -\frac{\varphi_{ВП}}{2} + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1); \\ \frac{b}{2\text{Sin}(\frac{\pi}{z}(1+2k) - \varphi)}, & \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1); \\ \frac{D}{2}, & \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1); \\ \frac{b}{2\text{Sin}(\varphi - \frac{\pi}{z}(1+2k))}, & \frac{\varphi_{ВП}}{2} + \varphi_B + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k \leq \varphi \leq \frac{\varphi_{ВП}}{2} + 2\varphi_B + \varphi_B + \frac{2\pi}{z}k, & k = 0 \dots (z-1); \end{cases} \quad (6)$$

где  $R$  и  $\varphi$  – полярный радиус и полярный угол точек профиля соответственно;

$D, d, b$  – наружный, внутренний диаметр и толщина шлица профиля соответственно.

$z$  – число шлицев.

В реальных условиях формообразования, при наличии в технологической системе погрешностей, параметры данной функции изменяются следующим образом

$$\begin{aligned}d' &= d + \Delta_{ИРФ} + 2\Delta_{ОРФ} + \Delta_{ГРФ} + \Delta_{СИРФЛ} + 2\Delta_{ЗУ} + 2\Delta_{ШБУ} + 2\Delta_{СБХЛ}; \\D' &= D + \Delta_0(1 + \text{Cos}(2\varphi + \pi)) + \Delta_K(L - L_0)/L; \varphi' = \varphi + \theta; \\D'' &= \sqrt{D'^2 - (2\Delta_{СМ}\text{Sin}(\varphi + \omega_1))^2} + 2\Delta_{СМ}\text{Cos}(\varphi + \omega_1); \\b' &= b\text{Cos}\gamma_{ГО}\text{Cos}\gamma_{СО},\end{aligned}\tag{7}$$

где  $d', D', D'', b', \varphi'$  – последовательные расчётные значения параметров кусочно-непрерывной функции (6);

$\Delta_{ИРФ}$  – упругая деформация инструмента;

$\Delta_{ОРФ}$  – упругая деформация опор инструментальной оправки;

$\Delta_{СИРФЛ}$  – смещение оси инструментальной оправки;

$\Delta_{ЗУ}$  – упругая деформация заготовки;

$\Delta_{ШБУ}$  – упругая деформация шпиндельного узла;

$\Delta_{СБХЛ}$  – смещение оси задней бабки;

$\Delta_0$  – овальность заготовки;

$\Delta_K$  – конусность заготовки;

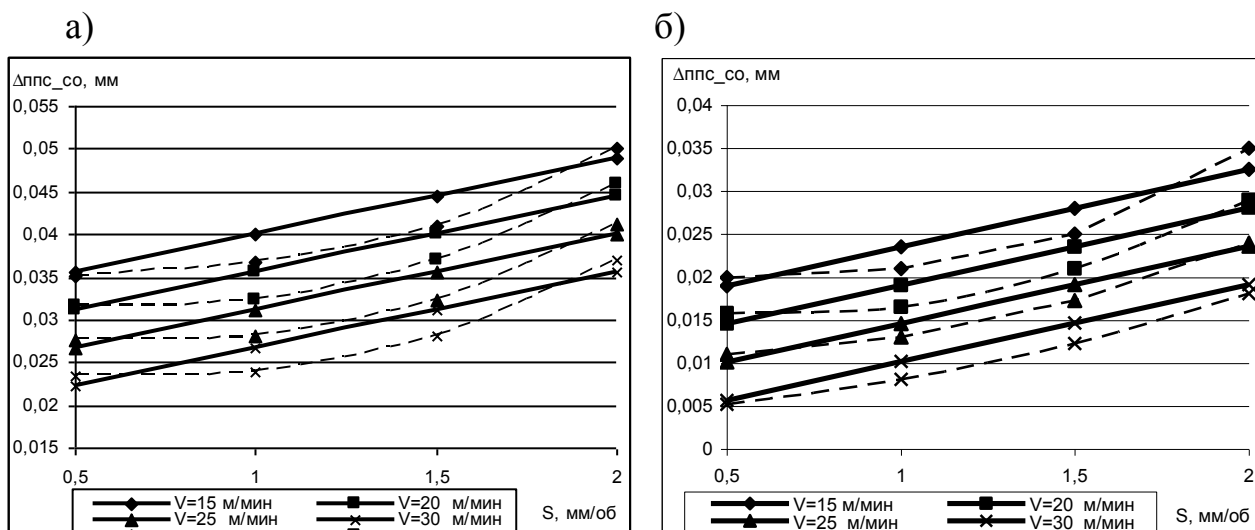
$\Delta_{СМ}$  – смещений центровых отверстий заготовки.

В итоге рассчитываются полярные координаты всех точек шлицевого профиля, а в дальнейшем, при повторении расчета, – координаты точек шлицевой поверхности, обработанной в реальных условиях формообразования.

На основе вышеизложенных математических зависимостей и способов учёта погрешностей технологической системы была разработана программа прогнозирования точности шлицефрезерования, позволяющая после ввода исходных данных произвести расчёт действительного полярного радиуса каждой точки шлицевой поверхности, а также с использованием рассчитанных данных определить величины её погрешностей и влияние каждого рассмотренного параметра на её точность. С использованием разработанной программы произведено теоретическое исследование точности шлицевой поверхности, формируемой в заданных условиях. По результатам исследования построены графики зависимостей её погрешностей от режимов обработки.

Для проведения дополнительной оценки результатов теоретического исследования разработана методика компьютерного конечно-элементного моделирования деформаций в технологической системе шлицефрезерования, позволяющая определить прогибы обрабатываемого вала и деформации, вызывающие возникновение его погрешностей. Расчет по этой методике предполагает учет влияния тех же факторов, что и при математическом моделировании. С помощью компьютерной методики произведено исследование, аналогичное теоретическому. Установлено, что полученные обоими методами формы зависимостей совпадают и подлежат проверке дальнейшими экспериментальными исследованиями.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований точности шлицефрезерования червячной фрезой. Для проверки прогнозных показателей математического моделирования, представленных в предыдущей главе, был запланирован и проведён полнофакторный эксперимент. По условиям эксперимента была обработана и проконтролирована партия валов из стали 45 со шлицевой поверхностью  $d-6\times 21h9\times 25D9\times 5$ , в диапазоне скоростей резания 15–30 м/мин, подач – 0,5-2 мм/об, без разделения и с разделением снимаемого припуска на два рабочих хода. Произведена статистическая обработка результатов и построение зависимостей погрешностей шлицевой поверхности от режимов обработки. Для примера на рисунке 3 представлены графики зависимостей погрешностей профиля продольного сечения образца в его середине.



а – обработка за два рабочих хода; б – обработка за один рабочий ход;  
экспериментальные зависимости (-); теоретические зависимости (---)

**Рисунок 3 – Изменение профиля продольного сечения образца**

По результатам анализа построенных зависимостей установлены соотношения величин режимов шлицефрезерования, позволяющих уменьшать погрешности шлицевого вала на величину, соответствующую требованиям

точности. При этом наименьшая погрешность профиля продольного сечения в разных точках по длине вала обеспечивается при подаче до 1 мм/об и скорости резания от 25 до 30 м/мин с обработкой за два хода. Минимальное значение отклонения от параллельности боковых сторон наблюдается при скорости резания 30 м/мин и продольной подаче 0,5 мм/об, а также при скорости резания 15 м/мин и продольной подаче 2 мм/об. Погрешность толщины шлица возрастает с увеличением продольной подачи и скорости резания.

Сравнительный анализ результатов экспериментальных и теоретических исследований процесса шлицефрезерования червячной фрезой подтвердил адекватность разработанной методики прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой (расхождение для различных погрешностей колеблется в интервале от 15 до 18 %).

**В четвертой главе** разработана методика определения собираемости прямобочного шлицевого соединения, для которой в качестве исходных данных могут быть использованы координаты точек шлицевой поверхности, полученные при прогнозировании точности шлицефрезерования. Она позволяет установить условия собираемости шлицевого сопряжения по боковым сторонам шлица. При этом возможны следующие случаи: 1) образующие боковых сторон параллельны и расположены так, что между ними образуется зазор; 2) образующие боковых сторон параллельны и между ними образуется натяг; 3) образующие боковых сторон пересекаются со свободной и несвободной собираемостью шлицевого сопряжения. В каждом случае определены зависимости, позволяющие получить конкретные значения зазоров и натягов в сопряжении. Для этого боковые поверхности шлицев представляются в виде образующих прямых. Уравнения образующих боковых сторон записываются в нормальном виде:

$$A_i x + B_i y + C_i = 0, \quad i = \overline{1,2}, \quad (8)$$

где  $A_i = y_{i2} - y_{i1}$ ,  $B_i = x_{i1} - x_{i2}$ ,  $C_i = x_{i2}y_{i1} - x_{i1}y_{i2}$  – коэффициенты функции;

$x_{i1}, y_{i1}$ ,  $x_{i2}, y_{i2}$  – координаты двух точек на образующей боковой поверхности шлица на валу – для  $i = 1$  и в отверстии – для  $i = 2$ .

С помощью нормальных уравнений образующих боковых поверхностей шлица на валу и в отверстии определяются условия собираемости прямобочного шлицевого соединения по боковым сторонам шлица. Для случая свободной собираемости шлицевого сопряжения условие собираемости принимает вид

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{B_1}{B_2} \quad \text{и} \quad t_1 = \frac{|C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}, \quad t_2 = \frac{|C_2|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}}, \quad t_1 < t_2, \quad (9)$$

где  $t_1, t_2$  – расстояние от оси симметрии сопряжения до образующих боковых поверхностей шлица на валу и в отверстии соответственно.

В случае выполнения условий (9) в сопряжении между боковыми сторонами образуется зазор  $\Delta$ , величина которого определяется из выражения

$$\Delta = \frac{|C_2|}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2}} - \frac{|C_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2}}. \quad (10)$$

Величины зазоров (натягов) могут быть использованы для определения оптимальных по точности центрирования взаимных положений вала и ступицы при приложении к валу крутящего момента (рисунок 4).

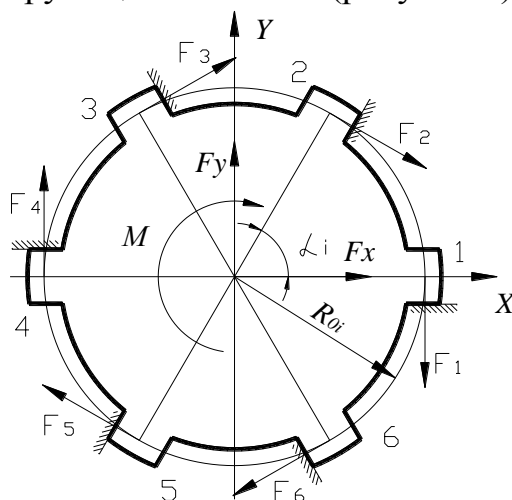


Рисунок 4 – Распределение рабочей нагрузки между шлицами соединения

Для этого составлено уравнение равновесия системы шлицев, оно имеет вид

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} = \frac{GA}{L} \begin{bmatrix} \sum \cos^2 \alpha_i & \sum \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sum R_{0i} \cos \alpha_i \\ \sum \cos \alpha_i \sin \alpha_i & \sum \sin^2 \alpha_i & \sum R_{0i} \sin \alpha_i \\ \sum R_{0i} \cos \alpha_i & \sum R_{0i} \sin \alpha_i & \sum R_{0i}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ \varphi \end{bmatrix}. \quad (11)$$

где  $F_x, F_y$  – силы, действующие в направлениях координатных осей  $Ox, Oy$ ,  
 $M$  – крутящий момент;  
 $G$  – модуль упругости второго рода;  
 $A$  – площадь продольного сечения шлица;  
 $L$  – длина на сдвиг;  
 $\alpha_i$  – угол направляющего косинуса;  
 $R_{0i}$  – плечо силы, равно половине среднего диаметра шлицевого вала;  
 $x, y, \varphi$  – линейные и угловое перемещения шлицевого вала относительно отверстия.

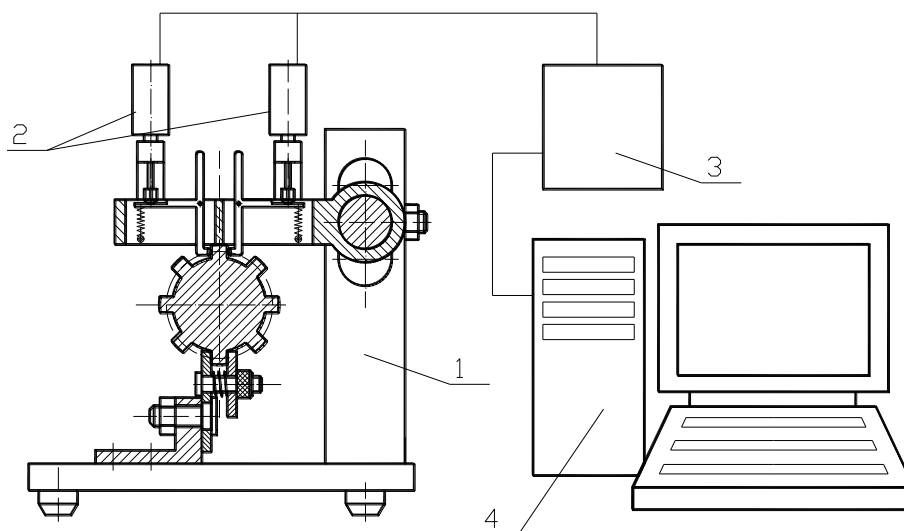
Таким образом рассчитываются значения всех относительных перемещений и поворотов вала и ступицы при замыкании зазоров под нагрузкой, что даёт возможность оценить сохранение центрирования соединения в эксплуатационных условиях.

При прогнозировании точности шлицевых соединений, детали которых подвергаются термообработке, предложено при расчёте координат использовать коэффициенты, позволяющие учитывать снижение точности при термообработке и повышение точности при шлифовании.

Для учёта погрешностей формообразующих поверхностей шлицевого соединения разработана методика компенсации погрешностей формообразующих поверхностей шлицевого соединения, осуществляющая их учёт и проверку выполнения центрирования соединения. Получены значения суммарных погрешностей в стандартных соединениях с различными способами центрирования, не ограничивающих собираемость.

**В пятой главе** предложено оценку точности шлицевых поверхностей деталей машин осуществлять на основе измерения координат точек шлицевого профиля. В качестве базовых элементов шлицевого профиля при этом используются системы осей шлицев профиля и центра системы осей, в качестве базовых элементов шлицевой поверхности – оси и плоскостей симметрии. Сформулированы общие принципы разделения суммарных погрешностей боковых сторон шлицевого профиля и шлицевой поверхности на элементарные погрешности.

Разработана и запатентована конструкция приспособления для контроля шлицевой поверхности, обеспечивающая одновременное измерение толщины, отклонения от симметричности и параллельности шлица, его направления, а также отклонения профиля продольного сечения (рисунок 5).



1 - приспособление для контроля шлицевых валов; 2 - индуктивные датчики линейного перемещения;  
3 - интерфейс; 4 - ЭВМ

**Рисунок 5 – Устройство для контроля шлицевого вала**

Для повышения производительности координатного контроля приспособление включено в состав автоматизированного комплекса, оснащённого персональным компьютером и программным обеспечением для обработки и анализа полученных данных. Приспособление прошло производственные испытания на Могилёвском заводе “Электродвигатель”, а также внедрено в учебный процесс ГУ ВПО “Белорусско-Российский университет

**В шестой главе** дано описание программы для прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой, в основу алгоритма которой положена разработанная методика прогнозирования. Приведён расчёт экономической эффективности внедрения программы, которое было осуществлено на РУПП “Станкозавод Красный борец”, (г. Орша) и на РУП “Могилёвский завод ”Электродвигатель.” На первом предприятии – в технологическую подготовку производства четырёх изделий общим количеством 440 шт. Экономический эффект от внедрения составил 4 045 337 р. На втором предприятии – в технологическую подготовку производства одного изделия с годовым объёмом выпуска – 3000 шт. Экономический эффект внедрения составил 5 425 681,7 р.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертации решена актуальная для машиностроения научно-техническая задача обеспечения точности изготовления прямобочных шлицевых соединений на основе прогнозирования оптимальных параметров технологической системы посредством анализа и моделирования технологических процессов изготовления шлицевых поверхностей валов и сборки соединений.

### **Основные научные результаты диссертации.**

1. Достигнуто обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых поверхностей валов за счёт оптимизации параметров технологической системы шлицефрезерования с учётом влияния режимов резания, геометрической точности и жесткости технологической системы [2, 4, 5, 8, 11, 12]. Для решения поставленной задачи в настоящей работе разработана методика прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой.

Эта методика отличается:

– комплексным учётом исходных данных о состоянии элементов технологической системы и их изменениями в процессе обработки, в том числе и жесткости заготовки при формировании детали;

– установленными зависимостями для определения влияния погрешностей технологической системы на точность формообразования шлицевого вала, для чего установлена система отсчёта, в которой шлицевый профиль представляется в виде кусочно-непрерывной функции, приращения координат точек которой определяются с учетом упругих деформаций и геометрической точности всех элементов технологической системы.

Применение разработанной методики позволяет:

– установить взаимосвязь входных параметров технологической системы с погрешностями формы, размеров и относительного положения формируемых шлицевых поверхностей валов;

– определить оптимальные режимы резания и управлять входными параметрами технологической системы для обеспечения и повышения точности изготовления прямобочных шлицевых поверхностей валов.

Адекватность разработанной методики подтверждена экспериментально на уровне значимости 0,05 [9, 10]. Для этого, по плану эксперимента, была обработана партия валов. Экспериментально установлено, что:

– наибольшая точность профиля продольного сечения шлицевого вала достигается при величине скорости главного движения 30 м/мин, величине подачи – 0,5 мм/об и при фрезеровании за два рабочих хода;

– наибольшая точность шлиц по их толщине достигается при подаче 0,5 - 0,6 мм/об, изменение скорости главного движения и числа рабочих ходов не оказывает существенного воздействия на величину этой погрешности;

– наименьшее значение отклонения от параллельности боковых сторон достигается при скорости главного движения 30 м/мин и величине подачи 1,75 – 2 мм/об, увеличение числа рабочих ходов не оказывает существенного воздействия на величину этой погрешности;

– отклонение от симметричности боковых поверхностей шлицев при обработке червячной фрезой не приобретает существенных значений.

2. Достигнуто обеспечение точности центрирования прямобочных шлицевых соединений путем оптимизации взаимного положения деталей при сборке и сохранения точности при эксплуатации с учётом погрешностей шлицевой поверхности вала.

Для решения этой задачи разработаны следующие методики.

Методика определения собираемости прямобочного шлицевого соединения [1, 6, 7], отличающаяся теоретически установленными зависимостями, связывающими координаты точек шлицевой поверхности вала с величинами зазоров и натягов в соединении при его сборке, а также с погрешностью центрирования вала и втулки при приложении крутящего момента в процессе эксплуатации.

Применение методики определения собираемости прямобочного



шлицевого соединения позволяет:

- установить взаимосвязь между точностью изготовления шлицевых поверхностей валов с собираемостью соединения и точностью его центрирования при эксплуатации;

- установить оптимальные по условиям собираемости взаимные положения вала и ступицы при сборке и по точности центрирования при приложении крутящего момента в процессе эксплуатации.

Методика компенсации погрешностей функциональных поверхностей шлицевого соединения, основанная на их размерном анализе, с помощью которой получены таблицы допустимых величин суммарных погрешностей шлицевых поверхностей деталей, обеспечивающих собираемость и точность центрирования стандартных соединений.

Применение разработанной методики позволяет назначать оптимальные квалитеты точности на нецентрирующие элементы, принадлежащие шлицевой поверхности.

3. Достигнуто расширение функциональных возможностей контроля точности прямобочных шлицевых профилей и поверхностей. Для этого разработана методика оценки точности шлицевых поверхностей на основе координатного метода моделирования [1, 3, 13], отличающаяся:

- способом определения положения базовых элементов шлицевого профиля на основе системы осей шлицев в профиле, а также осей и плоскостей симметрии прямобочной шлицевой поверхности;

- способом разделения суммарных погрешностей шлицевого профиля и поверхности: для профиля – отклонений от параллельности, симметричности, накопленной погрешности шага и погрешности ширины шлица, для поверхности – спиральность шлица на длине нормируемого участка, отклонения от плоскостности боковой поверхности и от профиля продольного сечения, перпендикулярного оси симметрии шлица.

Применение этой методики позволяет:

- производить координатный контроль прямобочных шлицевых поверхностей валов при отладке и выполнении технологического процесса;

- управлять точностью изготовления шлицевой поверхности по отдельным параметрам.

4. Создан и внедрён в производство коммерческий продукт – программа для прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой.

### **Рекомендации по практическому использованию результатов.**

Применение разработанных методик прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой позволяет

программным способом установить требуемые по условиям точности рациональные режимы резания с учётом исходного состояния основных элементов технологической системы.

Использование предлагаемых методик определения собираемости прямобочного шлицевого соединения позволяет обеспечить его собираемость и при необходимости, подобрать сопрягаемые по шлицевым поверхностям детали и определить их взаимные положения при сборке, проверить сохранение точности соединения при приложении рабочей нагрузки.

Применение методики компенсации погрешностей формообразующих поверхностей и полученных на её основе таблиц погрешностей прямобочных шлицевых соединений позволяет осуществлять учёт погрешностей и проверку выполнения центрирования соединения.

Использование методики оценки точности шлицевых поверхностей на основе координатного метода моделирования позволяет повысить точность контроля шлицевой поверхности с помощью используемых в машиностроении и разработанных в настоящей работе приспособлений и устройств.

Разработанные методики и программные средства могут быть использованы на промышленных предприятиях для обеспечения и повышения точности изготовления, контроля и сборки шлицевых соединений. В приложении Ж представлены акты их внедрений на двух предприятиях машиностроительного профиля Республики Беларусь. Суммарный годовой экономический эффект составил 9471018,7 р. Приспособление и методика контроля шлицевой поверхности использованы в учебном процессе ГУ ВПО “Белорусско-Российский университет” при проведении лабораторного практикума по дисциплине “Нормирование точности и технические измерения” (приложение Ж).

В качестве перспектив дальнейшего развития научного направления, данной диссертационной работы, можно отметить дальнейшие исследования приспособления для комплексного контроля, поиск оптимальных конструкций и компоновок шлицефрезерных станков, обеспечивающих точность обрабатываемых деталей, а также определение зон минимальных деформаций технологической системы в старых и новых конструкциях шлицефрезерных станков; поиск путей управления точностью шлицевых поверхностей с различным профилем исходя из условий собираемости и эксплуатации шлицевого соединения, в том числе и с использованием метода трёхмерной визуализации поверхностей.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Статьи

1. Шалыжин, К.А. Способ обеспечения качества формирования шлицевого соединения / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого.– 2006. – №4. – С. 40–48.

2. Шалыжин, К.А. Прогнозирование точности шлицефрезерования червячной фрезой / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // Вестник Белорусско-Российского университета Транспорт машиностроение. Metallургия электротехника экономика. Экономические науки: науч.-метод. журнал / редкол.: И.С. Сазонов [и др.] . – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет".–2008. – № 1(18). –С. 87–96.

3. Шалыжин, К.А. Координатный метод контроля шлицевой поверхности / К.А.Шалыжин // Вестник ПГУ. – 2008. – №2. – С. 57–64.

4. Шалыжин, К.А. Прогнозирование точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой с учетом изменяющейся жесткости технологической системы / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // Вестник Белорусско-Российского университета: науч.-метод. журнал / редкол.: И.С. Сазонов [и др.] . – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет".– 2009. - № 3. –С. 121–128.

### Материалы конференций

5. Будкевич, А.М. Автоматизация прогнозирования деформации технологической системы при точении / А.М. Будкевич, К.А. Шалыжин А.А. Жолобов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы респ. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет".–2004. – С. 22.

6. Шалыжин, К.А. Технологичность конструкций сборочных соединений при автоматической сборке / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // 40-я студенческая научно-техническая конференция: материалы конф. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет".–2004. – С. 180.

7. Шалыжин, К.А. Прогнозирование собираемости шлицевых соединений деталей машин / К. А. Шалыжин, А.А. Жолобов // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов/ М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. - Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет".-2005. - С. 80.

8. Шалыжин, К.А. Прогнозирование погрешностей шлицевого вала на основе моделирования и анализа деформаций в технологической системе / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апреля 2007г.: В 3-х ч. Ч.1 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет". – 2007. – С. 102–103.

9. Шалыжин, К.А. Прогнозирование и технологическое обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых соединений / К.А. Шалыжин // Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств: материалы V междунар. науч.-техн. конф. – Новополоцк.: УО ПГУ. – 2008.

10. Жолобов, А.А. Прогнозирование и технологическое обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых поверхностей / А.А. Жолобов, К.А. Шалыжин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. В 3-х ч. Ч.1/ М-во образования Респ. Беларусь [и др.]; редкол.: И.С. Сазонов [и др.]. – Могилев: ГУ ВПО "Белорусско-Российский университет". – 2009. – С. 64–65.

#### **Тезисы докладов**

11. Шалыжин, К.А. Моделирование процесса шлицефрезерования червячной фрезой / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // Информационные технологии, энергетика и экономика: сб. тр. V межрег. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – Смоленск: филиал ГОУ ВПО «МЭИ» (ТУ) в г. Смоленске. – 2008. – С. 141–145.

12. Шалыжин, К.А. Прогнозирование упругих деформаций заготовки при шлицефрезеровании / К.А. Шалыжин, А.А. Жолобов // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин: сб. науч. тр. междунар. науч.-техн. конф., В 3-х т. Т.2 / М-во образования Респ. Беларусь [и др.]. – Новополоцк: ПГУ. – 2009. – С. 282–285.

#### **Патенты**

13. Устройство для контроля шлицевых валов: пат. 2136, G 01B 3/00. / М.Ф. Пашкевич, А.А. Жолобов, К.А. Шалыжин; ГУВПО Белорусско-Российский университет. – №и 20050066; заявл. 14.02.2005; опубл. 30.09.2005.

## РЭЗЮМЭ

### ШАЛЫЖЫН КІРЫЛ АЛЯКСЕЕВІЧ

#### **Забеспяэнне дакладнасці вырабу прамабочных шліцавых злучэнняў на аснове прагназіравання аптымальных параметраў тэхналагічнай сістэмы**

**Ключавыя словы:** шліцавыя злучэнні, шліцафрэзераванне, чарвячная фрэза, каардынаты кантроль, зборнасць злучэнняў.

**Аб'ектам даследавання** з'яўляюцца тэхналагічныя сістэмы і працэсы фарміравання прамабочных шліцавых паверхняў валоў і зборкі шліцавых злучэнняў.

**Мэтай работы** з'яўляецца забеспячэнне дакладнасці вырабу прамабочных шліцавых злучэнняў на аснове прагназіравання аптымальных параметраў тэхналагічнай сістэмы шляхам аналізу і мадэліравання тэхналагічных працэсаў вырабу шліцавых паверхняў валоў і зборкі злучэнняў.

Распрацавана і эксперыментальна правярана комплексная метадыка прагназіравання дакладнасці формаўтварэння шліцавай паверхні, дазваляючая на этапе праектавання тэхналогіі, у кожным канкрэтным выпадку, забяспечваць дакладнасць фарміруемай шліцавай паверхні. На аснове ўказанай метадыкі створана праграма прагназіравання дакладнасці формаўтварэння шліцавай паверхні чарвячнай фрэзай.

Распрацавана метадыка ацэнкі зборнасці шліцавага злучэння, дазваляючая вызначыць магчымасць яе ажыццяўлення і атрымаць канкрэтныя значэнні зазораў і нацягаў па баках шліцаў у злучэнні, а таксама для любых іх значэнняў вызначыць зборнасць шліцавага злучэння дэталюў у момант прыкладання нагрузкі. Распрацавана метадыка кампенсацыі хібнасцей функцыянальных паверхняў шліцавага злучэння, заснаваная на іх размерным аналізе, з дапамогай якой атрыманы табліцы дапушчальных велічынь сумарных хібнасцей шліцавых паверхняў дэталюў, забяспечваючых зборнасць і дакладнасць цэнтрыравання стандартных злучэнняў.

Распрацавана метадыка ацэнкі дакладнасці шліцавых паверхняў на аснове каардынатнага метада мадэліравання. Створана прыстасаванне для кантролю шліцавай паверхні, якое пашырае функцыянальныя магчымасці кантролю за кошт забеспячэння магчымасці адначасовага вымярэння таўшчыні, адхілення ад сіметрычнасці і паралельнасці шліца, яго накірунку, а таксама адхілення профіля падоўжанага сячэння. Вынікі даследаванняў могуць быць выкарыстаны на прамысловых прадпрыемствах пры праектаванні тэхналогій вырабу і кантролю дэталюў, а таксама зборкі прамабочных шліцавых злучэнняў.

## РЕЗЮМЕ

ШАЛЫЖИН КИРИЛЛ АЛЕКСЕЕВИЧ

### **Обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых соединений на основе прогнозирования оптимальных параметров технологической системы**

**Ключевые слова:** шлицевые соединения, шлицефрезерование, червячная фреза, координатный контроль, собираемость соединений.

**Объектом исследования** являются технологические системы и процессы формирования прямобочных шлицевых поверхностей валов и сборки шлицевых соединений.

**Целью работы** является обеспечение точности изготовления прямобочных шлицевых соединений на основе прогнозирования оптимальных параметров технологической системы посредством анализа и моделирования технологических процессов изготовления шлицевых поверхностей валов и сборки соединений.

Разработана и экспериментально проверена комплексная методика прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности, позволяющая на этапе проектирования технологии, в каждом конкретном случае, обеспечивать точность формируемой шлицевой поверхности. На основе указанной методики создана программа прогнозирования точности формообразования шлицевой поверхности червячной фрезой.

Разработана методика оценки собираемости шлицевого соединения, позволяющая определить возможность её осуществления и получить конкретные значения зазоров и натягов на боковых сторонах шлицев в сопряжении, а также для любых их значений определить собираемость шлицевого соединения деталей при приложении нагрузки. Разработана методика компенсации погрешностей функциональных поверхностей шлицевого соединения, основанная на их размерном анализе, с помощью которой получены таблицы допустимых величин суммарных погрешностей шлицевых поверхностей деталей, обеспечивающих собираемость и точность центрирования стандартных соединений.

Разработана методика оценки точности шлицевых поверхностей на основе координатного метода моделирования. Создано приспособление для контроля шлицевой поверхности, расширяющее функциональные возможности контроля за счёт обеспечения возможности одновременного измерения толщины, отклонения от симметричности и параллельности шлица, его направления, а также отклонения профиля продольного сечения. Результаты исследований могут быть использованы на промышленных предприятиях при проектировании технологий изготовления и контроля деталей, а также сборки прямобочных шлицевых соединений.

Shalyzhin Kirill Alekseevich

**Assurance of accuracy of manufacturing straight-spline connections based on forecasting optimum parameters of the technological system**

**Key words:** spline connections, spline milling, hobbing cutter, coordinate control, joint assemblability.

**Subjects of inquiry** are technological systems and formation processes of straight-spline surfaces of shafts and assembly of spline connections.

**The purpose of the work** is assurance of accuracy of manufacturing straight-spline connections based on forecasting optimum parameters of the technological system by means of analysis and modeling of industrial processes of spline surfaces of shafts and junction assembling.

The complex prediction technique of forecasting accuracy of spline surface forming has been developed and experimentally tested. It makes it possible to assure accuracy of the spline surface being shaped in each case on the technology projecting stage. The program of accuracy forecasting of spline surface forming by the hobbing cutter has been based on the given method.

The method of assemblability estimation of spline connection has been developed. It makes it possible to estimate its occurrence and get specific gap value and tightness on side faces of splines and to test assemblability of spline connection of parts for different values at load. The method of error compensation of functional surfaces of spline connection which is based on dimensional analysis has been developed. With its help tables of allowable magnitudes of error of spline surfaces of parts have been created. They made it possible to ensure assemblability and centering accuracy of standard connections.

The method of accuracy estimate of spline surfaces based on coordinate simulation method has been developed. The device for spline surface control which broadens control functionalities at the expense of ensuring simultaneous thickness gauging, nonsymmetry and nonparallelism of the spline, its direction and profile deviation of the longitudinal section. The results of the research can be used on industrial enterprises at designing the manufacturing and control technique of parts, assemblage of straight-spline connections.

**ШАЛЫЖИН КИРИЛЛ АЛЕКСЕЕВИЧ**

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПРЯМОБОЧНЫХ  
ШЛИЦЕВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ  
ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

**Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

по специальности 05.02.08  
«Технология машиностроения»

Подписано в печать 09.09.2009 Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.  
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. 1,4. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 85 экз. Заказ № 592

Издатель и полиграфическое исполнение  
Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет»  
ЛИ № 02330/375 от 29.06.2004 г.  
212000, г. Могилев, пр. Мира, 43