

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи
УДК 621.9

КАЗАКОВ
Алексей Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ НА ОСНОВЕ
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения»

Могилёв 2016

Научная 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:

Мрочек Жорж Адамович,
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Технология
машиностроения» УО «Белорусский
национальный технический
университет», г. Минск

Довгалёв Александр Михайлович,
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Металлорежущие станки и
инструменты» ГУ ВПО «Белорусско-
Российский университет», г. Могилев

Оппонирующая организация

**УО «Белорусский государственный
аграрный технический университет»**,
г. Минск

Защита состоится «10» марта 2016 г. в 14.00 на заседании Совета по защите диссертаций К 02.18.01 при ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» по адресу: Республика Беларусь, 212000, г. Могилев, пр-т Мира, 43, корп. 1, каб. 323, телефон ученого секретаря +375 (222) 31-06-26.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет».

Автореферат разослан « 5 » февраля 2016 г.

Ученый секретарь
Совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент



С. В. Болотов

ВВЕДЕНИЕ

В машиностроении порядка двух третей изготавливаемых деталей составляют тела вращения, включая и ступенчатые валы, формирование поверхностей которых в последние годы всё чаще производится за счёт токарной обработки с применением станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Современные станки с ЧПУ отличаются высокой стоимостью и широким спектром технологических возможностей по повышению качества обрабатываемых изделий, к сожалению, не всегда рационально используемых. Так, возникающие в технологической системе резания (ТСР) переменные упругие деформации ухудшают качество формируемых поверхностей по показателям их точности и шероховатости. Одним из наиболее эффективных и перспективных направлений в обеспечении стабильности названных характеристик является структурно-параметрическая оптимизация, комплексно учитывающая последовательность снятия припусков и режимы резания с использованием опции станка по их изменению при формировании ступеней вала в условиях минимизации затрат времени на выполнение операции. Анализ публикаций в периодических научно-технических изданиях показал, что в последнее время данному вопросу уделяется особое внимание в таких странах, как Россия, США, Китай, Германия и др., при этом за основу исследований принимается параметрическая оптимизация режимов резания. Однако такой оптимизации недостаточно, т. к. обеспечение качества поверхностей ступенчатых валов с минимальными затратами времени на их формирование возможно только с определённым сочетанием рабочих и вспомогательных ходов, для чего необходима структурная оптимизация технологических переходов токарной операции. Исследований в этой области значительно меньше, а опубликованные результаты в определённой степени говорят об их незавершённости, потому что отсутствуют теоретические основы структурной оптимизации путём разделения операционного припуска на все возможные припуски ступеней, которые нужно удалить для формирования поверхностей вала. Практически отсутствуют сведения о взаимосвязи структурной и параметрической оптимизаций технологических переходов точения. Результаты исследований по обеспечению точности не учитывают специфику изменения жёсткости ступенчатой заготовки при её обработке и возможности станков с ЧПУ по стабилизации этого показателя в ТСР. Таким образом, создание теоретических и технологических условий обеспечения точности и связанной с ней шероховатости при минимальных затратах времени на обработку поверхностей ступенчатых валов представляет собой актуальную комплексную научно-практическую задачу, имеющую важное значение для машиностроительной отрасли.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами

Исследования по теме диссертации соответствуют приоритетным направлениям фундаментальных и прикладных научных исследований Государственной научно-технической программы «Разработка технологий рециклинга вторичных ресурсов и ресурсосберегающая модернизация промышленных технологий многоотраслевого назначения» на 2011–2015 годы. Диссертационная работа выполнялась в рамках госбюджетных тем ГБ-0619 «Создание интеллектуальных систем с адаптивными связями для управления качеством изделий машиностроения» (№ ГР 2006567) и ГБ-1105 «Разработка технологических основ и компьютерных средств обеспечения точности изделий машиностроения» (№ ГР 20111319) ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет», при выполнении которых автор являлся исполнителем.

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы являются теоретическое обоснование и технологическое обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов на основе структурно-параметрической оптимизации, позволяющие формировать качественные детали с минимальными затратами времени.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- разработать методику структурно-параметрической оптимизации технологических переходов наружного продольного точения поверхностей ступенчатых валов;
- разработать математическую модель, позволяющую прогнозировать точность формообразования ступеней вала с учётом изменяющейся в процессе обработки жёсткости заготовки;
- разработать теоретические методы, позволяющие на основе результатов структурно-параметрической оптимизации и прогнозирования точности механической обработки рассчитывать траекторию движения режущего инструмента, компенсирующую упругие деформации и геометрические неточности элементов ТСП;
- на основании выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработать и внедрить в производство программное обеспечение, позволяющее получать управляющие программы для токарных станков с ЧПУ, обеспечивающие выполнение технологических переходов токарной операции по рассчитанной траектории движения режущего инструмента.

Объект исследований – структурно-параметрическая оптимизация, которая является одним из эффективных и перспективных способов обеспечения

точности наружных цилиндрических поверхностей ступенчатых валов.

Предметом исследований являются структура токарной операции и связанные с ней основные технологические параметры механической обработки: режимы резания и жесткость ТСП, влияющие на шероховатость и точность формируемых поверхностей.

Научная новизна

Научная новизна работы заключается в том, что:

- разработаны теоретические основы структурной оптимизации токарной обработки ступенчатого вала, позволяющие установить возможные варианты выполнения технологических переходов;
- получена математическая модель параметрической оптимизации технологических переходов наружного продольного точения, учитывающая зависимость коэффициента и показателей степени в формуле скорости резания от подачи и позволяющая определить режимы резания, обеспечивающие наименьшее основное время обработки;
- получена математическая модель прогнозирования точности формообразования наружных цилиндрических поверхностей ступенчатых валов, учитывающая изменяющуюся в процессе обработки жесткость заготовки;
- на основе структурно-параметрической оптимизации теоретически решена комплексная задача обеспечения требуемой точности поверхностей ступенчатых валов при токарной обработке с минимальными затратами времени;
- разработано программное обеспечение автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ их формирования с учётом прогнозируемых деформаций элементов технологической системы резания и круговой интерполяции траектории движения режущего инструмента с использованием станков с ЧПУ.

Положения, выносимые на защиту

1. Методика структурно-параметрической оптимизации технологических переходов наружного продольного точения (№ 2015012 НХ, протокол № 8), включающая теоретические основы разделения операционного припуска на припуски ступеней вала и математическую модель определения режимов резания, учитывающую зависимость коэффициента и показателей степени в формуле скорости резания от подачи, позволяющая установить возможные варианты выполнения технологических переходов, обеспечивающие наименьшее основное время обработки.

2. Математическая модель прогнозирования точности формообразования наружных цилиндрических поверхностей при точении, отличающаяся возможностью учёта изменяющейся в процессе обработки жесткости заготовки, позволяющая определять влияние геометрических параметров и упругих деформаций ТСП на погрешности размеров и формы обрабатываемых ступеней вала.

3. Теоретические методы, включающие результаты структурно-параметрической оптимизации и прогнозирования точности механической обработки для расчёта траектории движения режущего инструмента, позволяющей компенсировать погрешности, вызванные упругой деформацией и геометрической неточностью элементов технологической системы резания.

4. Программное обеспечение (свидетельство № 850 от 14.01.2016 г., акт внедрения), отличающееся возможностью создания управляющих программ для станков с ЧПУ, позволяющих осуществлять технологические переходы токарной операции по траектории, рассчитанной с учётом результатов структурно-параметрической оптимизации и прогнозируемых деформаций элементов технологической системы резания.

5. Результаты экспериментальных исследований, которые адекватно подтвердили, что выполнение технологических переходов по разработанным управляющим программам позволяет повысить точность поверхностей на 20–40 % и производительность на 25–30 % при формировании ступенчатых валов с обеспечением шероховатости в пределах 1,2–2,7 мкм по критерию Ra , что соответствует 7–8 квалитетам точности (акт испытаний).

Личный вклад соискателя учёной степени

Соискателем получены следующие результаты: разработаны методика структурно-параметрической оптимизации технологических переходов наружного точения ступенчатых валов и структура информационного обеспечения, позволяющие автоматизировать расчеты, проводимые для её осуществления; разработаны теоретические основы структурной оптимизации токарной обработки ступенчатого вала, позволяющие установить возможные варианты выполнения технологических переходов путём разделения операционного припуска на все возможные припуски ступеней, которые требуется удалить для формирования поверхностей вала; разработана математическая модель параметрической оптимизации, учитывающая зависимость коэффициента и показателей степени в формуле скорости резания от подачи и позволяющая определить режимы резания, обеспечивающие минимальное основное время; получена математическая модель прогнозирования точности поверхностей при токарной обработке ступенчатых валов, основанная на решении дифференциального уравнения изогнутой оси вала, позволяющая оценивать влияние внешних силовых факторов на упругую деформацию элементов ТСП и учитывать изменяющуюся жесткость ТСП и формируемого изделия; разработаны теоретические методы расчета коррекции траектории движения режущего инструмента, основанной на структурно-параметрической оптимизации и прогнозировании точности при формировании поверхностей ступенчатого вала; представлена интегрированная система автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ их токарной обработки.

Постановка целей и задач исследований, анализ экспериментальных и теоретических результатов проводились совместно с научным руководителем канд. техн. наук, проф. А. А. Жолобовым, а экспериментальные исследования по коррекции траектории движения инструмента и определению деформаций технологической системы – совместно с канд. техн. наук А. М. Федоренко при участии инженера А. В. Ваньковича.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Результаты диссертации докладывались на 41-й студенческой научно-технической конференции в Белорусско-Российском университете (Могилев, 17–21 мая 2005 г.), на 6-й Международной научно-технической конференции «Информационно-компьютерные технологии» в Житомирском государственном технологическом университете (Житомир, 2006 г.), на Республиканской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и студентов «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» в Белорусско-Российском университете (Могилев, 26 января 2006 г.), на Международных научно-технических конференциях молодых учёных «Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности» в Белорусско-Российском университете (Могилев, 20–21 ноября 2008 г., 16–17 апреля 2009 г., 19–20 ноября 2009 г., 30–31 октября 2013 г.), на Международных научно-технических конференциях «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» в Белорусско-Российском университете (Могилев, 20–21 апреля 2006 г., 19–20 апреля 2007 г., 22–23 апреля 2010 г., 21–22 апреля 2011 г., 24–25 апреля 2014 г.).

Опубликование результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 21 печатной работе, в том числе в монографии (5 авторских листов) и 6-ти статьях (2,2 авторского листа), включённых в перечень ВАК, 12-ти материалах международных научно-технических и научно-практических конференций (0,8 авторского листа), сборнике научных трудов (0,1 авторского листа), включены в 2 отчёта по НИР, получено одно свидетельство о регистрации компьютерной программы.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из титульного листа, оглавления, введения, общей характеристики работы, основной части, включающей 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего список использованных источников из 158-ми наименований и список публикаций соискателя из двадцати одного наименования, 11-ти приложений. Диссертация содержит 110 страниц основного текста, 90 рисунков. Объём приложений – 66 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении обоснованы актуальность темы диссертации и связь работы с научными программами и темами, сформулированы цель и задачи исследования, положения диссертации, выносимые на защиту, и её научная новизна, представлены сведения об объекте исследования. Указаны сведения о личном вкладе соискателя и апробации результатов исследования, их опубликованности, структуре и объеме диссертации.

В первой главе приведен анализ работ в области обеспечения точности при токарной обработке, обоснованы цель и задачи исследования. На основе проведенного анализа показано, что выполненные ранее работы в этом направлении рассматривают многие факторы, касающиеся соблюдения требуемых параметров формируемой поверхности. Однако их результаты больше подходят для гладких валов (штоки гидроцилиндров, валы отбора мощности, карданные и ходовые валы и т. п.) и мало приемлемы при точении ступенчатых, т. к. не учитывают специфику изменения жёсткости ступенчатой заготовки при её обработке. Большинство исследований основаны на параметрической оптимизации, направлены на повышение производительности обработки и не принимают во внимание зависимость коэффициента и показателей степени в формуле скорости резания от подачи, что не позволяет адекватно осуществлять процесс оптимизации. Если учесть, что поверхности ступенчатых валов можно обработать, выполнив различное сочетание рабочих и вспомогательных ходов, то для обеспечения точности обработки необходима структурная оптимизация технологических переходов точения. Показано, что наибольший эффект от мероприятий по обеспечению точности может быть достигнут при комплексном решении поставленной задачи, основанном на структурно-параметрической оптимизации.

Во второй главе представлены методика структурно-параметрической оптимизации и автоматизация расчётов при её осуществлении (рисунок 1). Основой методики являются информационное и математическое обеспечения.

Информационное обеспечение включает в себя:

- базу данных станков, содержащую сведения о возможностях приводов главного движения и подач требуемого станка, а также величины жёсткости шпиндельного узла и задней бабки;
- базу данных режущих инструментов, содержащую сведения о геометрических и конструктивных параметрах резцов;
- базу данных рекомендуемых подач, коэффициентов и показателей степени, содержащую справочную информацию для расчёта скорости и составляющих силы резания.

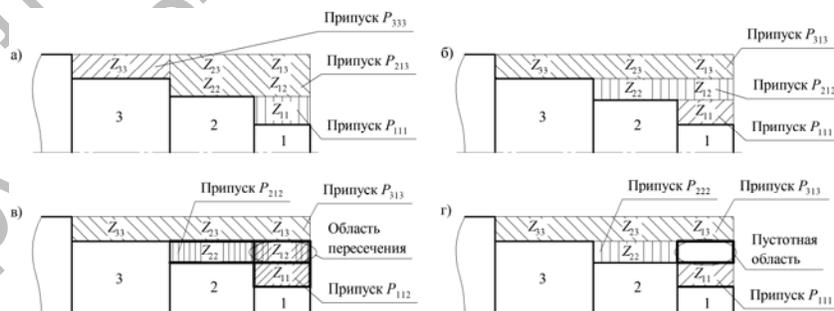


Рисунок 1. – Схема автоматизации расчётов для структурно-параметрической оптимизации наружного продольного точения цилиндрических поверхностей ступенчатых валов

Математическое обеспечение состоит из комплекса математических моделей и аналитических зависимостей, каждая из которых соответствует определённому этапу выполнения структурно-параметрической оптимизации.

Этап 1. Разделение операционного припуска на все возможные припуски ступеней, которые необходимо снять для формирования вала.

На этом этапе реальная деталь с помощью уравнения разделения операционного припуска на элементарные части представляется в виде закодированной информации вида P_{klm} (рисунок 2), где k – номер ступени, $k = 1, 2, \dots, n$; l – номер крайней правой ступени, объединенной с k -й ступенью по длине, $l = 1, 2, \dots, k$; m – номер ступени большего диаметра из ступеней, объединенных припуском по длине, $m = k, k + 1, \dots, n$; n – число обрабатываемых ступеней.



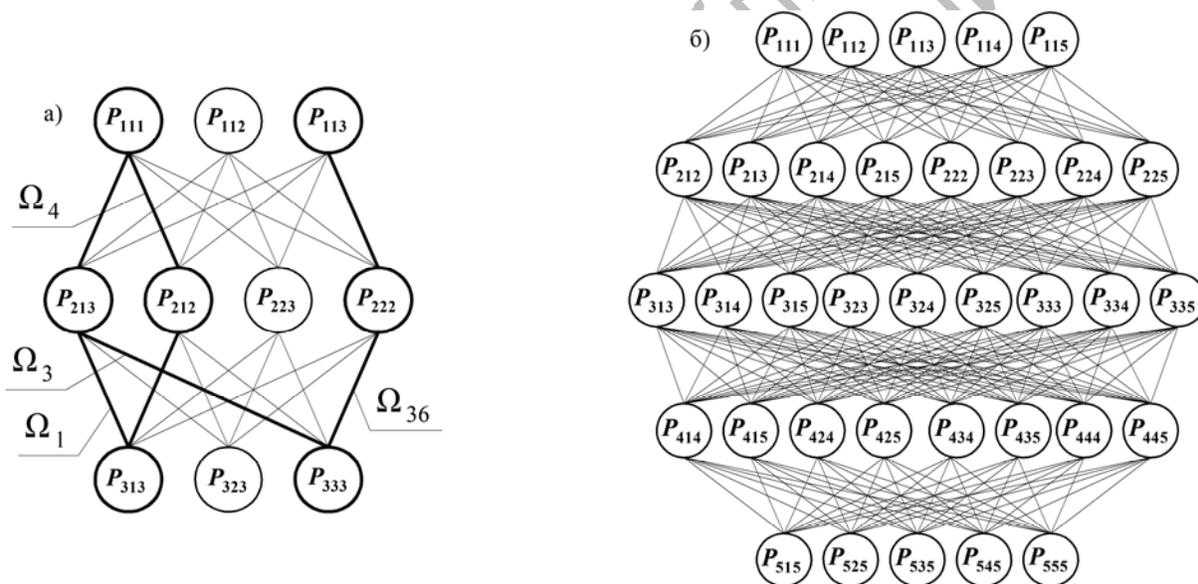
а, б – допустимые варианты; в, г – недопустимые варианты

Рисунок 2. – Примеры вариантов обработки при $n = 3$

В дальнейшем вариант обработки представлен как упорядоченное множество $\Omega_s = \{(P_{klm})_i\}$, в котором находится только по одному припуску

каждой ступени (для трёх обрабатываемых ступеней варианты обработки представлены множествами $\Omega_1 - \Omega_{36}$ (рисунок 3, а)). На основе анализа параметров уравнения разделения операционного припуска на элементарные части установлено, что при объединении элементарных частей в припуски ступеней вала образуются как допустимые (рисунок 2, а, б), так и недопустимые (рисунок 2, в, г) варианты обработки. Последние автоматически исключаются на основании анализа графа припусков (рисунок 3), для чего получена функция определения допустимых вариантов обработки Ω_{sd} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \Omega_{sd} = \bigcup_{r=1}^{n-1} \{P_{k,l,m_r}\} \text{ при} \\ ((k_r > k_w) \wedge ((l_r > k_w) \vee (m_w < k_r))) \vee ((k_r < k_w) \wedge ((m_r < k_w) \vee (l_w > k_r))) = \text{ИСТИНА,} \\ P_{k,l,m_r} \in \Omega_s, P_{k_w,l_w,m_w} \in \Omega_s, w = r + 1 \dots n; \\ \sum_{i=1}^n F((P_{klm})_i) = \frac{n^2 + n}{2}, \text{ где } (P_{klm})_i \in \Omega_{sd}. \end{array} \right. \quad (1)$$



а – граф для трёх ступеней; б – граф для пяти ступеней

Рисунок 3. – Граф обозначений (кодов) припусков

Проверяя каждую ветвь графа по (1), можно получить список допустимых вариантов обработки Ω_{sd} . Однако припуски в этих вариантах обработки располагаются по возрастанию номера ступени вала, что не всегда соответствует той последовательности, в которой они должны удаляться. Например, для трёх обрабатываемых ступеней один из вариантов обработки имеет вид $\Omega_4 = \{P_{111}, P_{212}, P_{313}\}$ (рисунок 2, б), что недопустимо, т. к. припуск с кодом P_{111} нельзя удалить перед припуском с кодом P_{212} . Кроме этого, один и тот же вариант может основывать несколько подвариантов обработки $\Omega_{s,p}$. Так,

для трёх обрабатываемых ступеней вариант обработки $\Omega_3 = \{P_{111}, P_{213}, P_{333}\}$ (рисунок 2, а) может иметь два подварианта обработки: $\Omega_{3,1} = \{P_{213}, P_{111}, P_{333}\}$ и $\Omega_{3,2} = \{P_{213}, P_{333}, P_{111}\}$. Поэтому после определения общего числа и структуры вариантов необходимо установить последовательность удаления припусков в каждом варианте. Сначала нужно найти припуск, который будет удалён первым. Первым в данной последовательности обработки удаляется тот припуск, у которого l имеет минимальное значение ($l = 1$), а m – максимальное ($m = n$). Для варианта обработки Ω_3 результат выполнения этой операции выглядит следующим образом: $\Omega_3^* = \{P_{213}, P_{111}, P_{333}\}$. Из оставшихся $n - 1$ припусков данного варианта обработки образуется вектор обозначений (кодов) припусков. Из элементов полученного вектора последовательными перестановками строятся разные подварианты обработки $\Omega_{s,p}$. Для проверки возможности свободного удаления припусков в том порядке, в котором они представлены множеством $\Omega_{s,p}$, необходимо, чтобы каждый следующий припуск не создавал препятствий для удаления предыдущего. В общем виде условие свободного удаления припуска имеет вид:

$$\begin{aligned} & ((k_r > k_w) \wedge (m_w < k_r)) \vee ((k_r < k_w) \wedge (l_w > k_r)) = \text{ИСТИНА} \\ & \text{при } P_{k,l,m_r} \in \Omega_{s,p}, P_{k_w,l_w,m_w} \in \Omega_{s,p}, r = 1 \dots n, w = r + 1 \dots n. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя (1) и (2), можно выявить допустимые варианты обработки для любого числа формируемых ступеней n .

Этап 2. Переход к реальной детали, т. е. представление закодированной информации в виде набора координат, устанавливающих положение каждой ступени вала в системе координат станка с ЧПУ.

Понятие варианта обработки является абстрактным, т. к. содержит коды припусков ступеней вала и никак не связано с реальными геометрическими параметрами этих ступеней, поэтому получены аналитические зависимости, описывающие связь кода припусков ступеней варианта обработки с реальными размерами данных ступеней и координатной системой токарного станка с ЧПУ.

Этап 3. Параметрическая оптимизация и построение вариантов обработки. При помощи зависимостей перехода к размерам реальной детали описывается изменение координат, но не обеспечивается представление о том, как распределяется глубина резания на каждый рабочий ход. Кроме того, от глубины резания зависят такие параметры, как скорость резания и подача, которые оказывают прямое влияние на производительность. Для определения сочетания параметров V , S_o , t , обеспечивающих минимальное основное время для каждого рабочего хода, на базе их ограничений разработана математическая модель параметрической оптимизации.

В связи с тем, что постоянный коэффициент C_v и показатели степени x_v , y_v ,

m_v в формуле расчёта скорости резания зависят от подачи, установлено, что многоугольник, образованный системой ограничений, не является выпуклым в отличие от утверждений в ранее выполненных работах.

На базе разработанной модели структурно-параметрической оптимизации выполнено моделирование производительности для всех имеющихся место вариантов обработки трёх ступеней вала и установлена возможность повышения производительности механической обработки до 25–30 % за счёт уменьшения основного времени.

В третьей главе для осуществления прогнозирования точности токарной обработки поверхностей ступенчатых валов представлена математическая модель, позволяющая оценить влияние деформаций заготовки, инструмента, задней и передней бабок станка на точность размеров и формы обрабатываемых поверхностей ступенчатого вала.

В полученной модели были учтены пространственные отклонения, погрешность установки, смещение центровых отверстий (при обработке в центрах), погрешность базирования заготовки в патроне, смещение оси задней бабки, податливость шпиндельного узла, податливость задней бабки, упругая деформация заготовки и инструмента.

Математическая модель имеет отличие от моделей, предлагаемых в ранее выполненных работах, заключающееся в использовании дифференциального уравнения изогнутой оси ступенчатого вала для расчёта упругих деформаций, возникающих в технологической системе резания при изменяющейся жёсткости изделия. Такой подход направлен на более полное раскрытие сущности моделирования процессов механической (токарной) обработки ступенчатых валов с применением станков с ЧПУ.

Для определения влияния различных внешних силовых факторов на упругие деформации элементов ТСП и погрешности формируемых в процессе обработки цилиндрических поверхностей получено общее решение дифференциального уравнения изогнутой оси вала, на основе которого установлены зависимости, описывающие совместные воздействия изгибающего момента, поперечной силы и собственного веса заготовки на упругие деформации элементов ТСП.

При помощи полученных зависимостей описана погрешность обработки, вызванная упругими деформациями шпиндельного узла, задней бабки, заготовки и смещением оси задней бабки, для трёх видов закрепления (в центрах, в патроне с поджатием задним центром, в патроне).

Во время работы резец находится в состоянии сложного сопротивления. Он одновременно испытывает внецентренное сжатие и изгиб с кручением, поэтому для более точного определения деформаций технологической системы резания, особенно при использовании станков с ЧПУ, точность которых

задается считанными микрометрами, в работе учитывается именно такое напряжённо-деформированное состояние резца.

На основе результатов структурно-параметрической оптимизации и прогнозирования точности было проведено моделирование профиля продольного сечения ступеней вала для различных вариантов обработки, в результате чего установлено, что последовательность выполнения технологических переходов оказывает влияние на точность обработки.

В четвёртой главе для обеспечения точности процесса точения представлены теоретические методы расчета коррекции траектории движения режущего инструмента, обоснованной результатами структурно-параметрической оптимизации и прогнозирования точности механической обработки, и интегрированная система автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ их формирования с использованием токарных станков с ЧПУ.

Прогнозирование точности токарной обработки на стадии проектирования технологических процессов позволяет получить множество точек $\{Z_i; X_i\}$ для каждого рабочего хода режущего инструмента, которое характеризует упругие деформации, возникающие в ТСР. Для их компенсации траектория движения режущего инструмента должна проходить через эти точки.

При перемещении режущего инструмента от точки к точке по прямой в начале пути суппорт станка будет разгоняться, а в конце пути произойдёт замедление скорости перемещения для выполнения операции позиционирования. В этом случае суппорт станка будет перемещаться рывками, вызывая дополнительные колебания в технологической системе, что снижает точность механической обработки. Для того чтобы получить траекторию движения режущего инструмента, не вызывающую дополнительных колебаний в технологической системе, следует обеспечивать плавный переход от точки к точке, т. е. перемещение режущего инструмента должно происходить по гладкой траектории. Поскольку дуга окружности является гладкой кривой, а программный интерфейс систем ЧПУ поддерживает круговую интерполяцию, то в качестве перемещения от точки к точке целесообразно использовать перемещение по дуге окружности.

Для построения дуги окружности достаточно трёх точек. При использовании встроенного цикла круговой интерполяции G02(G03) на токарных станках с ЧПУ, требующего ввода конечной точки дуги и её радиуса, возникает необходимость определения радиуса дуги по трём точкам для вычисления всех параметров цикла круговой интерполяции.

Пусть заданы три точки с координатами $(Z_i; X_i)$, $(Z_{i+1}; X_{i+1})$, $(Z_{i+2}; X_{i+2})$. Тогда центр дуги, проходящей через эти точки, будет лежать в точке пересечения серединных перпендикуляров отрезков (рисунок 4, прямые 1 и 2),

начала и концы которых имеют координаты $(Z_i; X_i)$, $(Z_{i+1}; X_{i+1})$ и $(Z_{i+1}; X_{i+1})$, $(Z_{i+2}; X_{i+2})$.

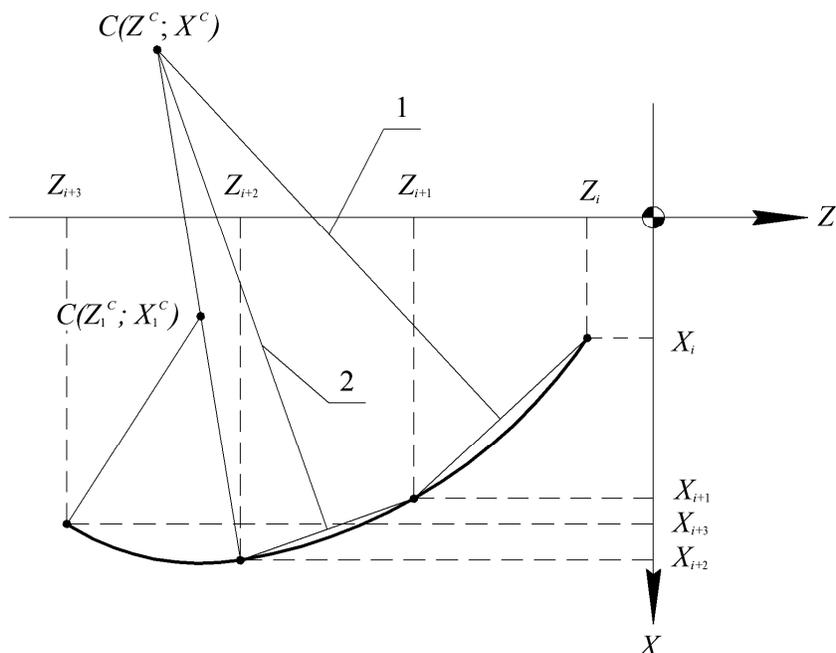


Рисунок 4. – Схема определения координат центра дуги

Для того чтобы определить координаты точки пересечения прямых 1 и 2 (рисунок 4), составлена система линейных уравнений, описывающих эти прямые в системе координат станка:

$$\begin{cases} A_1 Z^C + B_1 X^C = A_1 Z_{i,i+1} + B_1 X_{i,i+1}; \\ A_2 Z^C + B_2 X^C = A_2 Z_{i+1,i+2} + B_2 X_{i+1,i+2}, \end{cases} \quad (3)$$

где $A_1 = Z_{i+1} - Z_i$; $B_1 = X_{i+1} - X_i$; $A_2 = Z_{i+2} - Z_{i+1}$; $B_2 = X_{i+2} - X_{i+1}$;

Z^C – координата центра дуги по оси Y;

X^C – координата центра дуги по оси X;

$$Z_{i,i+1}^C = \frac{Z_i + Z_{i+1}}{2}, \quad Z_{i+1,i+2}^C = \frac{Z_{i+1} + Z_{i+2}}{2}, \quad X_{i,i+1}^C = \frac{X_i + X_{i+1}}{2}, \quad X_{i+1,i+2}^C = \frac{X_{i+1} + X_{i+2}}{2}.$$

Для получения следующего дугового участка траектории движения режущего инструмента используются точки с координатами $(Z_{i+2}; X_{i+2})$, $(Z_{i+3}; X_{i+3})$ (рисунок 4) и система уравнений (4).

$$\begin{cases} A_{10} Z_1^C + B_{10} X_1^C = C_{10}; \\ A_{21} Z_1^C + B_{21} X_1^C = C_{21}, \end{cases} \quad (4)$$

где $A_{10} = X_{i+2} - X^C$; $B_{10} = Z^C - Z_{i+2}$; $C_{10} = Z_{i+2} \cdot (X_{i+2} - X^C) - X_{i+2} \cdot (Z_{i+2} - Z^C)$;
 $A_{21} = 2 \cdot (Z_{i+3} - Z_{i+2})$, $B_{21} = 2 \cdot (X_{i+3} - X_{i+2})$; $C_{21} = (Z_{i+3})^2 - (Z_{i+2})^2 + (X_{i+3})^2 - (X_{i+2})^2$;
 X_1^C – координата центра следующего дугового участка по оси X ;
 Z_1^C – координата центра следующего дугового участка по оси Z .

Скорректированная траектория движения режущего инструмента содержит набор дуговых участков, обход которых может осуществляться как по часовой, так и против часовой стрелки (встроенные циклы круговой интерполяции G02, G03). Для решения разработан и используется алгоритм определения направления обхода дугового участка скорректированной траектории.

В пятой главе представлены результаты экспериментальных исследований, целью которых являлась проверка адекватности теоретических зависимостей, предназначенных для прогнозирования точности токарной обработки ступенчатых валов с использованием станков с ЧПУ, и расчёта скорректированной траектории движения режущего инструмента.

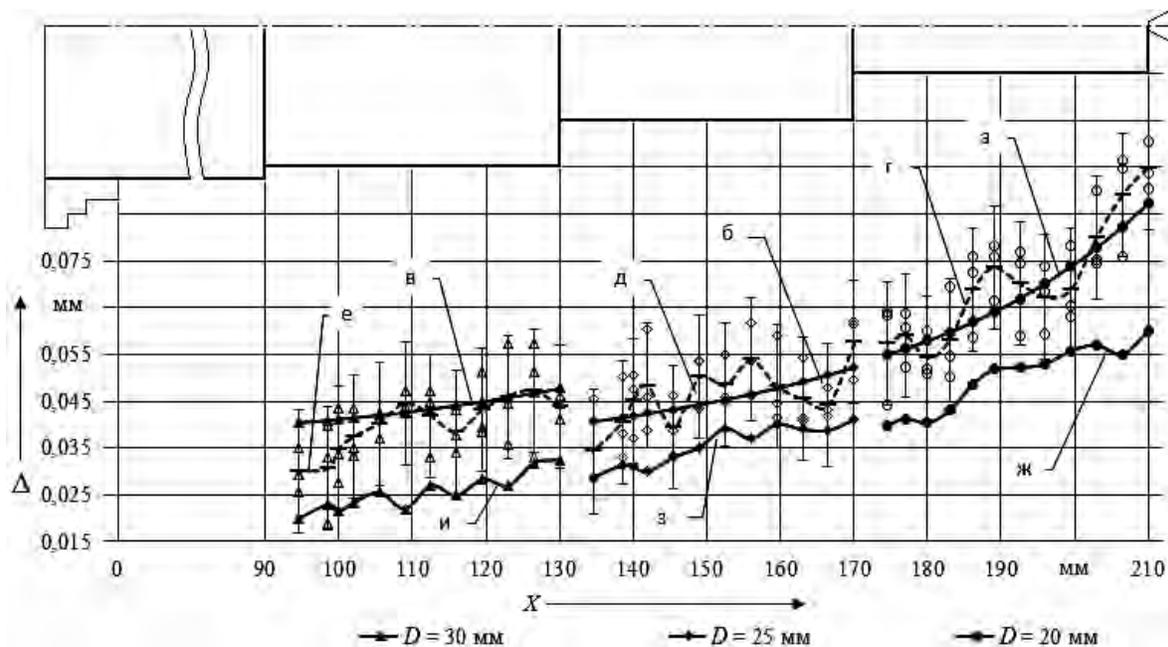
Экспериментальные точностные исследования состоят из трёх частей: исследования жёсткости шпиндельного узла, задней бабки, погрешностей профиля продольного сечения ступеней вала, образующихся в результате обработки до и после коррекции траектории движения режущего инструмента.

При измерении и анализе жёсткости шпиндельного узла в качестве выходного параметра была выбрана его деформация под действием силы, для задней бабки – деформация под действием силы в зависимости от вылета пиноли. Для обоих узлов эксперимент проводился при пятикратном дублировании опытов. В процессе эксперимента, в соответствии с планом, были выполнены замеры деформации узлов под действием силы. Измерение исследуемых параметров осуществлялось с помощью динамометра ДОСМ-3-0,2 и электронного индикатора Мископ ИЦ-12,5, 0,001. По результатам экспериментов были определены величины жёсткости и построены соответствующие зависимости для конкретного станка модели 16К20Ф3, с использованием которого производилась последующая обработка образцов.

Измерения проводились на координатно-измерительной машине DuraMax. Исходными данными эксперимента являлись диаметры обрабатываемых ступеней $D_1 = 20$, $D_2 = 25$, $D_3 = 30$ мм; длины обрабатываемых ступеней $L_1 = L_2 = L_3 = 40$ мм; диаметр заготовки $D_{заг} = 38$ мм; длина заготовки $L_3 = 210$ мм; материал заготовки – сталь 45 ($\sigma_B = 610$ МПа, $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па). Параметры инструмента: материал режущей пластины – T15K6; передний угол $\gamma = 0^\circ$; главный угол в плане $\varphi = 90^\circ$; радиус при вершине $r = 3$ мм. Заготовка устанавливалась в патроне с поджимом задним центром.

Использование интегрированной системы автоматизированного проектирования ступенчатых валов и программ токарной обработки, основанных на управлении траекторией формообразующих элементов, показало, что точность

обработки деталей по критерию «отклонение от цилиндричности» (ГОСТ 24642-81) в условиях эксперимента была повышена на 20–40 % (рисунок 5).



а, б, в – построенные на основе модели; г, д, е – построенные на основе измерений после обработки без применения коррекции траектории движения режущего инструмента; ж, з, и – построенные на основе измерений после обработки с применением коррекции траектории движения режущего инструмента

Рисунок 5. – Погрешности профиля продольного сечения ступеней вала

Кроме точностных параметров токарной обработки, проводились исследования шероховатости сформированных поверхностей посредством её измерения в начале, середине и в конце осевых сечений каждой ступени с поворотом детали относительно её оси на 120° при помощи профилометра мод. TR210. С учётом пятикратного дублирования опытов и трёхкратного измерения шероховатости в каждом из сечений образца сделан вывод о том, что среднеарифметическое значение величины Ra даёт достоверный результат. На основании этих исследований установлено, что шероховатость поверхностей ступеней валов по критерию Ra находится в пределах от 1,2 до 2,7 мкм, что соответствует микро-неровностям деталей 7–8 квалитетов точности, причём меньшая шероховатость имеет место при большей жёсткости ТСР.

Комплексное использование структурно-параметрической оптимизации и обеспечение перемещения резца по рассчитанной траектории позволяют одновременно повысить точность и производительность в пределах 20–40 % и 25–30 % соответственно.

Представленная система освоена на Оршанском станкостроительном заводе «Красный борец» с экономическим эффектом 26042200 р. (в ценах

2014 года) и используется при обучении студентов специальностей 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств», 1-36 01 01 «Технология машиностроения» кафедры «Технология машиностроения» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» в рамках дисциплин «Программирование обработки на станках с ЧПУ», «Технология автоматизированного изготовления деталей и узлов».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана методика структурно-параметрической оптимизации технологических переходов наружного продольного точения (№ 2015012 НХ, протокол № 8), включающая теоретические основы разделения операционного припуска на припуски ступеней вала и математическую модель определения режимов резания, которая учитывает зависимость коэффициента и показателей степени в формуле скорости резания от подачи, позволяющая установить возможные варианты выполнения технологических переходов и обеспечить наименьшее основное время обработки [3, 6, 13, 15].

2. Разработана математическая модель прогнозирования точности формообразования наружных цилиндрических поверхностей при точении, которая отличается возможностью учёта изменяющейся в процессе обработки жёсткости заготовки и позволяет определять влияние геометрических параметров и упругих деформаций ТСП на погрешности размеров и формы обрабатываемых поверхностей ступенчатых валов. Статистической обработкой экспериментальных данных была подтверждена адекватность разработанной модели прогнозирования точности формообразования поверхностей ступенчатых валов на уровне значимости 0,05 [1, 2, 4, 8, 10, 17, 19].

3. Разработаны теоретические методы, отличающиеся возможностью на основе результатов структурно-параметрической оптимизации и прогнозирования точности механической обработки рассчитать траекторию движения режущего инструмента, обеспечивающую компенсацию погрешностей, вызванных упругой деформацией и геометрической неточностью элементов технологической системы резания [5, 12, 14, 18].

4. Разработана интегрированная система автоматизированного проектирования поверхностей ступенчатых валов и управляющих программ их формирования (свидетельство № 850 от 14.01.2016 г.), основанная на струк-

турно-параметрической оптимизации, прогнозировании точности процесса точения и теоретических методах расчета коррекции траектории движения режущего инструмента, которая позволяет сократить срок технологической подготовки производства, повысить точность (до 20–40 %) при увеличении производительности (на 25–30 %) обработки поверхностей деталей с обеспечением шероховатости в пределах 1,2–2,7 мкм по критерию Ra (акт испытаний) [7, 9, 11, 16, 20].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Полученные результаты являются теоретической основой для разработки программных средств проектирования и совершенствования технологических операций токарной обработки, учитывающих возможности современных станков с ЧПУ, обеспечивающих требуемую точность и шероховатость при высокой производительности [1, 3, 6, 13, 15].

2. На основании результатов исследований разработана интегрированная система автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ их формирования (свидетельство № 850 от 14.01.2016 г.), которая внедрена в производство на Оршанском станкостроительном заводе «Красный борец» и используется при токарной обработке валов ЗЕ711В.32.0.206.0.00, ЗД711ВФ11.79.0.201.0.00, шпинделя ООС.10.2.215.1.00 (акт внедрения). Годовой экономический эффект от внедрения составил 26042200 р. по состоянию на 10.10.2014 г.

3. Разработанное программное обеспечение (свидетельство № 850 от 14.01.2016 г.) используется при обучении студентов специальностей 1-53 01 01 «Автоматизация технологических процессов и производств», 1-36 01 01 «Технология машиностроения» кафедры «Технология машиностроения» ГУ ВПО «Белорусско-Российский университет» в рамках дисциплин «Программирование обработки на станках с ЧПУ» и «Технология автоматизированного изготовления деталей и узлов» (акт внедрения).

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Монографии

1. Технологическое обеспечение качества ступенчатых валов и шлицевых соединений : монография / А. А. Жолобов, К. А. Шалыжин, А. В. Казаков, Е. Ю. Демиденко ; под общ. ред. А. А. Жолобова. – Смоленск : Принт-Экспресс, 2014. – 204 с.

Статьи в научных журналах

2. **Жолобов, А. А.** Застосування 3D моделі ГВМ для підвищення продуктивності та якості механічної обробки / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вісник ЖДТУ. – 2006. – № 4 (39). – С. 21–25.

3. **Жолобов, А. А.** Методика определения вариантов обработки ступенчатого вала в задаче структурной оптимизации / А. А. Жолобов, А. М. Федоренко, А. В. Казаков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2008. – № 4 (21). – С. 76–84.*

4. **Жолобов, А. А.** Особенности расчёта упругих деформаций технологической системы при токарной обработке ступенчатого вала / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2009. – № 3 (24). – С. 87–95.*

5. **Жолобов, А. А.** Коррекция траектории движения режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Вестн. Полоц. гос. ун-та. – 2009. – № 9. Сер. С. – С. 124–133.*

6. **Казаков, А. В.** Оптимизация режимов резания технологических переходов наружной токарной обработки ступенчатых валов на станке с ЧПУ / А. В. Казаков, А. А. Жолобов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2012. – № 4 (37). – С. 23–31.*

7. **Казаков, А. В.** Прогнозирование и обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов / А. В. Казаков, А. А. Жолобов // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2014. – № 1(42). – С. 6–14.*

Статьи в сборниках научных трудов

8. **Жолобов, А. А.** Особенности расчёта упругих деформаций ступенчатого вала в процессе токарной обработки / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Материалы, технологии и оборудование в производстве, эксплуатации, ремонте и модернизации машин : сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф. ; Новополоцк, 29–30 апр. 2009 г. : в 3 т. / М-во образования Респ. Беларусь. – Новополоцк, 2009. – Т. 2. – С. 285–289.

* – публикации внесены в базу РИНЦ (Российский индекс научного цитирования).

Материалы конференций

9. **Казаков, А. В.** Исследование и разработка процедур имитационного 3D-моделирования токарных операций / А. В. Казаков // Материалы 41-й студенческой науч.-техн. конф., Могилев, 17–21 мая 2005 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2005. – С. 68.

10. **Жолобов, А. А.** Оптимизация и прогнозирование качества токарной обработки ступенчатых валов в ГПМ / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апр. 2006 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2006. – Ч. 1. – С. 58–59.

11. **Казаков, А. В.** Моделирование гибких производственных модулей в среде CAD-системы / А. В. Казаков, А. Н. Рязанцев // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 19–20 апр. 2007 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, – 2007. – Ч. 1. – С. 63–64.

12. **Федоренко, А. М.** Коррекция траектории движения режущего инструмента на токарных станках с ЧПУ / А. М. Федоренко, А. В. Казаков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 20–21 нояб. 2008 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 63.

13. **Казаков, А. В.** Структурная оптимизация переходов механической обработки ступенчатых валов / А. В. Казаков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 20–21 нояб. 2008 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2008. – С. 46.

14. **Казаков, А. В.** Определение направления обхода дугового участка скорректированной траектории движения токарного резца / А. В. Казаков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности : материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 16–17 апр. 2009 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 66–67.

15. **Казаков, А. В.** Параметрическая оптимизация технологических переходов, выполняемых на токарном станке с ЧПУ / А. В. Казаков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 19–20 нояб. 2009 г. : М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2009. – С. 18.

16. **Жолобов, А. А.** Интегрированная САПР технологических операций токарной обработки, выполняемых на станках с ЧПУ / А. А. Жолобов, А. В. Казаков // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях: материалы Международ. науч.-практ. конф., Брянск, 16–18 нояб. 2009 г. / Федеральное агентство по образованию БГТУ; под ред. В. И. Аверченкова. – Брянск, 2009. – С. 14.

17. **Жолобов, А. А.** Особенности расчёта упругих деформаций технологической системы при токарной обработке полого ступенчатого вала / А. А. Жолобов, А. В. Казаков, А. В. Ванькович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международ. науч.-техн. конф., Могилев, 22–23 апр. 2010 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2010. – Ч. 1. – С. 45.

18. **Жолобов, А. А.** Влияние геометрических параметров резца на погрешность привязки / А. А. Жолобов, А. В. Казаков, А. В. Ванькович // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международ. науч.-техн. конф., Могилев, 21–22 апр. 2011 г. : в 3 ч. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2011. – Ч. 1. – С. 34.

19. **Казаков, А. В.** Особенности прогнозирования точности обработки ступенчатых валов на токарных станках с ЧПУ / А. В. Казаков // Новые материалы, оборудование и технологии в промышленности: материалы Международ. науч.-техн. конф. молодых ученых, Могилев, 30–31 окт. 2013 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2013. – С. 19.

20. **Казаков, А. В.** Интегрированная система автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ токарной обработки / А. В. Казаков, А. А. Жолобов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы Международ. науч.-техн. конф., Могилев, 24–25 апр. 2014 г. / М-во образования Респ. Беларусь [и др.] ; редкол. : И. С. Сазонов [и др.]. – Могилев, 2014. – С. 27–28.

Свидетельства о регистрации компьютерных программ

21. Интегрированная система автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ их токарной обработки : свидетельство о регистрации компьютерной программы № 850 / А. В. Казаков ; заявитель и правообладатель Белорус.-Рос. ун-т. – № С20150115 ; заявл. 27.11.2015 ; зарегистр. 14.01.2016. – 1 с.

РЭЗІЮМЭ

Казакоў Аляксей Уладзіміравіч

Тэарэтычнае абгрунтаванне і тэхналагічнае забеспячэнне дакладнасці такарнай апрацоўкі ступеньчатых валоў на аснове структурна-параметрычнай аптымізацыі

Ключавыя словы: дэфармацыя, сілы рэзання, тэхналагічная сістэма рэзання, такарная апрацоўка, павышэнне дакладнасці, аптымізацыя, прадукцыйнасць, матэматычная мадэль, ступеньчатыя валы, прагназіраванне, карэкцыя траекторыі руху рэжучага інструмента.

Аб'ект даследавання: структурна-параметрычная аптымізацыя, якая з'яўляецца адным з эфектыўных і перспектыўных спосабаў забеспячэння дакладнасці цыліндрычных паверхняў ступеньчатых валоў.

Мэта работы: тэарэтычнае абгрунтаванне і тэхналагічнае забеспячэнне дакладнасці такарнай апрацоўкі ступеньчатых валоў на аснове структурна-параметрычнай аптымізацыі, якія дазваляюць фарміраваць якасныя дэталі з мінімальнымі выдаткамі часу.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаваны тэарэтычныя асновы структурнай аптымізацыі такарнай апрацоўкі ступеньчатага вала, якія дазваляюць усталяваць магчымыя варыянты выканання тэхналагічных пераходаў; атрымана матэматычная мадэль параметрычнай аптымізацыі тэхналагічных пераходаў, якая ўлічвае залежнасць каэфіцыента і паказчыкаў ступені ў формуле хуткасці рэзання ад падачы і якая дазваляе вызначыць рэжымы рэзання, якія забяспечваюць найменшы асноўны час апрацоўкі; атрымана матэматычная мадэль прагназіравання дакладнасці формаўтварэння цыліндрычных паверхняў ступеньчатых валоў, якая ўлічвае зменлівую ў працэсе апрацоўкі цвёрдасць загатоўкі; на аснове структурна-параметрычнай аптымізацыі тэарэтычна вырашана комплексная задача забеспячэння патрабаванай дакладнасці паверхняў ступеньчатых валоў пры такарнай апрацоўцы з мінімальнымі выдаткамі часу; распрацавана праграмае забеспячэнне аўтаматызаванага праектавання ступеньчатых валоў і кіруючых праграм іх фарміравання з выкарыстаннем станкоў з ЛПК з улікам прагназуемых дэфармацый элементаў тэхналагічнай сістэмы рэзання і кругавой інтэрпаляцыі траекторыі руху рэжучага інструмента.

Галіна ўжывання: канструктарская і тэхналагічная падрыхтоўка машынабудаўнічай вытворчасці.

РЕЗЮМЕ

Казаков Алексей Владимирович

Теоретическое обоснование и технологическое обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов на основе структурно-параметрической оптимизации

Ключевые слова: деформация, силы резания, технологическая система резания, токарная обработка, повышение точности, оптимизация, производительность, математическая модель, ступенчатые валы, прогнозирование, коррекция траектории движения режущего инструмента.

Объект исследования: структурно-параметрическая оптимизация, которая является одним из эффективных и перспективных способов обеспечения точности наружных цилиндрических поверхностей ступенчатых валов.

Цель работы: теоретическое обоснование и технологическое обеспечение точности токарной обработки ступенчатых валов на основе структурно-параметрической оптимизации, позволяющие формировать качественные детали с минимальными затратами времени.

Полученные результаты и их новизна: разработаны теоретические основы структурной оптимизации токарной обработки ступенчатого вала, позволяющие установить возможные варианты выполнения технологических переходов; получена математическая модель параметрической оптимизации технологических переходов наружного продольного точения, учитывающая зависимость коэффициента и показателей степени в формуле скорости резания от подачи и позволяющая определить режимы резания, обеспечивающие наименьшее основное время обработки; получена математическая модель прогнозирования точности формообразования наружных цилиндрических поверхностей ступенчатых валов, учитывающая изменяющуюся в процессе обработки жёсткость заготовки; на основе структурно-параметрической оптимизации теоретически решена комплексная задача обеспечения требуемой точности поверхностей ступенчатых валов при токарной обработке с минимальными затратами времени; разработано программное обеспечение автоматизированного проектирования ступенчатых валов и управляющих программ их формирования с использованием станков с ЧПУ с учётом прогнозируемых деформаций элементов технологической системы резания и круговой интерполяции траектории движения режущего инструмента.

Область применения: конструкторская и технологическая подготовка машиностроительного производства.

SUMMARY

Kazakou Aliaksei Uladzimiravich

Theoretical substantiation and technological ensure the accuracy of turning stepped shafts based on structural-parametric optimization

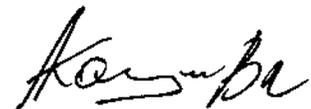
Keywords: deformation, cutting forces, the technological system of cutting, turning, improved accuracy, optimization, performance, mathematical model, stepped shafts, forecasting, trajectory correction movement of the cutting tool.

Object of research: structural-parametric optimization, which is one of the most effective and promising way to ensure the accuracy of external cylindrical surfaces of stepped shafts.

Objective: theoretical basis and technological support for the accuracy of turning stepped shafts on the basis of structural-parametric optimization, enable the development of high-quality parts with minimal time.

The results obtained and their novelty: the theoretical basis of structural optimization of turning a stepped shaft, allowing to establish the options of technological transitions; the mathematical model of parametric optimization of technological transitions outer longitudinal turning, and takes into account the dependence of the exponents in the formula of the cutting speed and feed allows to determine the cutting conditions, ensuring the least most of the time of treatment; A mathematical model for predicting the accuracy of forming the outer cylindrical surfaces of stepped shafts, taking into account the changing rigidity during machining the workpiece; on the basis of structural and parametric optimization theory solved the complex task of ensuring the required precision surfaces stepped shaft for turning with minimal time; developed CAD software stepped shafts and control programs for their formation using CNC machine tools, taking into account the projected deformation elements of technological system of cut and circular interpolation motion path of the cutting tool.

Scope: design and technological preparation of engineering production.



КАЗАКОВ
Алексей Владимирович

**ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ
ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
СТУПЕНЧАТЫХ ВАЛОВ НА ОСНОВЕ
СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.08 «Технология машиностроения»

Подписано в печать 04.02.2016. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,70. Тираж 60 экз. Заказ № 69.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Государственное учреждение высшего профессионального образования
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.