

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



Нестеренко Павел Сергеевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ НЕЖЕСТКИХ
ДЕТАЛЕЙ НА ОСНОВЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
ПРОЦЕССОМ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ**

Специальности: 05.02.07 – «Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки»

05.02.08 – «Технология машиностроения»

Диссертация

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Чигиринский Юлий Львович

Волгоград – 2020

Оглавление

Введение	5
Глава 1. Анализ проблемы обеспечения требуемой точности токарной обработки нежестких валов и путей её решения. Постановка цели и задач исследования.	13
1.1. Характеристика конструктивных особенностей нежестких валов и технологии их изготовления.....	13
1.2. Анализ способов обеспечения требуемой точности и качества токарной обработки нежестких валов	19
1.2.1. Обработка на заниженных режимах и многопроходная обработка	19
1.2.2. Повышение точности и жесткости технологической системы.....	20
1.2.3. Комбинированные методы обработки	24
1.2.4. Обработка с применением систем автоматического управления	26
1.2.4.1. Обзор существующих систем автоматического управления	28
1.2.4.2. Структурный анализ процесса токарной обработки как объекта управления	39
Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования.....	41
Глава 2. Методика проведения экспериментальных исследований	45
2.1. Металлорежущее оборудование, задействованное при проведении исследований	45
2.2. Обработываемые материалы, режущий инструмент	48
2.3. Методика исследования силовых характеристик процесса резания	53
2.4. Методика исследования геометрической точности обработанных деталей.	55
2.5. Методика исследования шероховатости после механической обработки	58
2.6. Методика обработки результатов экспериментальных исследований.....	60
Выводы по главе 2.....	67
Глава 3. Влияние технологических условий токарной обработки на геометрическую точность обработки нежесткого вала.....	68
3.1. Анализ влияния упругих деформаций элементов технологической системы под действием постоянной силы резания на точность обработки	68

3.2. Анализ влияния режимных параметров и условий обработки на величину радиальной составляющей силы резания. Построение уточненных математических моделей	82
3.3. Анализ влияния упругих деформаций технологической системы на величину радиальной составляющей силы резания. Общее выражение погрешности обработки.....	94
3.4. Экспериментальная проверка результатов теоретических исследований	98
Выводы по главе 3.....	99
Глава 4. Автоматическое управление точностью продольного профиля нежестких валов при токарной обработке	101
4.1. Постановка технологической задачи	101
4.2. Анализ физических принципов управления точностью токарной обработки и выбор законов управления.	102
4.3. Структурная и функциональные схемы и алгоритм функционирования системы автоматического управления.....	107
4.4. Реализация разработанной системы автоматического управления	110
4.5. Разработка ограничений по допустимой величине подачи исходя из требований предъявляемых к шероховатости обработанной поверхности.....	115
Выводы по главе 4.....	119
Глава 5. Промышленное применение разработанной системы автоматического управления при обработке нежестких валов	121
5.1. Экспериментальное исследование эффективности применения программного контура управления.....	121
5.2. Определение ожидаемого экономического эффекта от использования разработанной системы управления при обработке детали «Винт».	125
5.3. Расширение области применения разработанной системы автоматического управления.....	126
Выводы по главе 5.....	127
Основные результаты работы и выводы.....	128
Список использованных источников.....	131

Приложение А. Структура выпуска валов и структура общей трудоемкости в машиностроении.....	146
Приложение Б. Матрицы планирования экспериментов для случая построения математических моделей при обработке стали 20ХН	147
Приложение В. Акт об использовании результатов исследования на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»	149
Приложение Г. Основные публикации по теме диссертационного исследования ..	151

Введение

Актуальность темы исследования:

Современный этап развития машиностроения, в связи со стремлением к снижению металлоемкости изделий, характеризуется значительным ростом номенклатуры деталей, которые в виду большого соотношения длины к диаметру ($l/d > 10 \div 12$) могут быть отнесены к типу нежестких валов. Детали данного типа нашли широкое применение в различных областях машиностроения: автомобилестроении, ракетно-космической отрасли, авиастроении, судостроении, станкостроении, точном приборостроении и т.д. При этом к деталям данного типа в большинстве случаев, в виду их функционального назначения, предъявляются высокие требования к качеству и точности размеров, формы и взаимного расположения исполнительных поверхностей.

Наиболее трудоемким и при этом во многом определяющими, за счет технологической наследственности, конченую точность обработки при изготовлении деталей типа нежесткий вал являются токарные операции. Одновременно с этим, в ряде случаев, исходя из требований к точности и качеству поверхностей деталей, токарная обработка может являться окончательным видом обработки. При этом, помимо негативного влияния неконтролируемых возмущающих воздействий, характерных всем видам обработки, на точность токарной обработки деталей данного типа существенное влияние оказывают и значительные упругие деформации заготовки, переменные по ходу обработки. Кроме того, в детали формируются неравномерные остаточные напряжения приводящие к потере точности в результате их последующей релаксации. Поэтому на практике для снижения величины упругих деформаций прибегают к различным технологическим приемам (многопроходная обработка, увеличение жесткости технологической системы путем введения дополнительных опор, многоцикловая термообработка и т.д.), увеличивающим трудоемкость изготовления и зачастую не обеспечивающим требуемой точности, в связи с чем, становится очевидной научная проблема исследования, которая состоит в несогласованности высоких требований к точности и качеству изделий машиностроения, применительно к изделиям малой жесткости, с одной стороны, и недостаточной эффективностью существующих методов обеспечения этих требований, с другой.

Существенный вклад в решение проблемы анализа процесса резания, обеспечения требуемой точности обработки и разработки систем управления и контроля внесли многие отечественные и зарубежные ученые: А. М. Абакумов [4], Б. М. Базров [9, 15], Б. С. Балакшин [9], Б. М. Бржозовский [22, 23], О. И. Драчев [6, 41], В. Л. Заковоротный [47], М. С. Невельсон [68], Д. И. Петрешин [87], А. Л. Плотников [89], В. Г. Подпоркин [91], Ю. М. Соломенцев [8], А. Г. Суслов [110, 111], А. Г. Схиртладзе [112, 113], М. М. Тверской [117], В. А. Тимирязев [9], О. А. Ямникова [128], A. Gola, A. Świć [140, 152], A. G. Ulsoy, Y. Koren [134, 138], T. L. Schmitz [150] и многие другие.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что наиболее эффективным методом решения проблемы обеспечения требуемой точности обработки является обработка с применением адаптивного управления, суть которого заключается в поднастройке технологической системы в соответствии с возникшими в процессе обработки изменениям условий её протекания исходя из оперативной информации о процессе резания. Однако, несмотря на большое количество научных исследований и разработанных систем управления, эффективность их применения при токарной обработке нежестких валов весьма ограничена в виду недостаточного учета физических особенностей протекания процессов обработки и дальнейшей релаксации длинномерных заготовок в алгоритмах их функционирования. Кроме того, в большинстве своем данные системы являются самостоятельными объектами с аппаратным управлением и не могут быть установлены на станках ЧПУ. Однако, наиболее эффективно применение систем адаптивного управления именно на станках с ЧПУ, так как многие узлы станков, такие как бесступенчато регулируемые приводы подач и главного движения и PLC-контроллеры могут быть использованы в качестве исполнительных механизмов системы управления. Все эти обстоятельства говорят об актуальности представленного исследования.

Объектом исследования является процесс токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ.

Предметом исследования является процесс формирования параметров геометрической точности и качества поверхностей, получаемых в результате токарной обработки нежестких валов.

Исследования, представленные в данной работе, являются частью исследований по направлению «Автоматизация технологической подготовки производства», разрабатываемому на кафедре «Технология машиностроения» ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет».

Цель работы: Обеспечение требуемой точности формы и размеров обработанных деталей типа нежесткий вал и сохранение достигнутой точности во времени путем автоматического управления процессом резания при токарной обработке на станках с ЧПУ.

Поставленная цель достигается путем решения следующих **задач**:

1. Задачи по специальности 05.02.08

1. На основании структурного анализа процесса токарной обработки как объекта управления и анализа существующих систем автоматического управления, выявить параметры регулирования, стабилизация которых в процессе токарной обработки нежестких валов, за счет изменения величины параметра управления, позволит обеспечить требуемую точность формы и размеров обработанных деталей, а также сохранить достигнутую точность во времени (в процессе хранения и эксплуатации).

2. Произвести анализ влияния упругих деформаций элементов технологической системы на точность формы и размеров обработанных деталей и разработать уточненную математическую модель для расчета ожидаемой погрешности обработки, учитывающую физические особенности протекания процесса токарной обработки нежестких заготовок.

3. На основании структурного анализа процесса токарной обработки как объекта управления и исходя из физических особенностей обработки нежестких заготовок разработать способ управления, позволяющий производить обработку на рациональных режимах резания и обеспечивающий достижение требуемой точности формы и размеров обработанных деталей, а также сохранение достигнутой точности во времени.

2. Задачи по специальности 05.02.07

4. Разработать уточненные математические модели параметров состояния процесса резания и показателей качества обработки, учитывающие теплофизические свойства контактной пары «инструмент-заготовка».

5. Разработать структурную и функциональную схемы и алгоритм функционирования системы автоматического управления процессом токарной обработки, применимой на станках с ЧПУ без необходимости изменения их конструкции, обеспечивающей достижение требуемой точности формы и размеров обработанных деталей и сохранение достигнутой точности во времени.

6. Провести экспериментальные исследования эффективности применения разработанной системы управления и разработать рекомендации по её применению.

Научная новизна

В результате проведённых исследований решена актуальная научно-производственная задача обеспечения требуемой точности формы и размеров обработанных деталей типа нежесткий вал и сохранения достигнутой точности во времени. Сущность решения составляют научные результаты, приведенные в табл. В.1.

Таблица В.1. Пункты научной новизны диссертационного исследования

Области исследований по специальности 05.02.07 [31]	Пункт научной новизны	Области исследований по специальности 05.02.08 [31]
-----	<p>1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что на точность формы и размеров обработанных деталей оказывают существенное влияние изменение податливости нежестких заготовок по ходу обработки, обусловленное постоянным изменением соотношения длин обработанной и обрабатываемой частей, и взаимовлияние величины упругих деформаций технологической системы и радиальной составляющей силы резания в процессе обработки, выражающееся в непостоянстве глубины резания в виду постоянного изменения расстояния между осью детали и режущей кромкой инструмента, а также разработана математическая модель для определения ожидаемой погрешности обработки, в отличие от существующих учитывающая влияние данных факторов, что позволяет повысить достоверность расчетов на этапе проектирования технологического процесса.</p>	<p>3. Математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения.</p>

<p>2. Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий.</p>	<p>2. Экспериментально подтверждено прямое влияние теплопроводности инструментального материала на величину радиальной составляющей силы резания и шероховатости обработанных поверхностей при токарной обработке сталей перлитного класса и определена степень этого влияния для ряда сталей, а также разработаны соответствующие статистические математические модели, в отличие от существующих учитывающие теплофизические свойства контактной пары «инструмент-заготовка», применение которых позволит повысить достоверность расчетов и эффективность алгоритмов управления процессом обработки.</p>	<p>-----</p>
<p>3. Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки.</p>	<p>3. Предложена и обоснована математическая модель для определения траектории движения режущего инструмента, обеспечивающей компенсацию влияния погрешностей, возникающих вследствие упругих деформаций элементов технологической системы в процессе токарной обработки нежесткого вала, обрабатываемого в опорах, на точность и качество готовой детали.</p>	<p>2. Технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие хода, обеспечивающие повышение качества изделий и снижение их себестоимости. 7. Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин.</p>
<p>1. Теория и практика проектирования, монтажа и эксплуатации станков, станочных систем, в том числе автоматизированных цехов и заводов, автоматических линий, а также их компонентов, оптимизация компоновки, состава комплектующего оборудования и его параметров, включая использование современных методов информационных технологий. 4. Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки.</p>	<p>4. Разработана структурная и функциональные схемы и алгоритмическое обеспечение двухконтурной системы автоматического управления процессом токарной обработки., обеспечивающей проведение обработки на рациональных режимах резания с достижением требуемой точности и качества обработки, а также сохранением достигнутых результатов обработки во времени, путем программного управления траекторией движения режущего инструмента и одновременной адаптивной силовой стабилизации процесса резания.</p>	<p>8. Проблемы управления технологическими процессами в машиностроении.</p>

Практическая ценность и реализация результатов работы:

Применение программного контура разработанной системы автоматического управления позволит: повысить точность токарной обработки нежестких валов в среднем на 38-40 % без снижения производительности, а также снизить величину последующего искривления деталей в среднем более чем в 4 раза по сравнению с обработкой без применения автоматического управления. Результаты исследования приняты ко внедрению на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» (г. Волгоград). Прогнозируемый годовой экономический эффект от внедрения составляет 123 649,6 рублей.

Разработанные уточненные методики определения радиальной составляющей силы резания и ожидаемой погрешности обработки нежесткого вала, вызванной упругими деформациями технологической системы, а также созданный на их основе программный комплекс могут быть использованы:

- на предприятиях машиностроительной отрасли при проектировании технологических процессов токарной обработки нежестких валов и разработке управляющих программ для станков с ЧПУ;

- в учебном процессе машиностроительных вузов в рамках лабораторных и практических занятий при подготовке бакалавров / магистров по направлению: 15.03.05 / 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Методология и методы исследования. При теоретических исследованиях использовались основные положения технологии машиностроения, теории резания, теории упругопластического деформирования; экспериментальные исследования проводились в соответствии с общепринятыми методами математической статистики и теорией планирования экспериментов с использованием современного металлорежущего оборудования, лицензионного программного обеспечения, аттестованных и метрологически обеспеченных средств измерения геометрических параметров деталей, силы резания, шероховатости поверхностей.

Положения, выносимые на защиту:

- уточненная математическая модель процесса упругой деформации нежесткого вала обрабатываемого в опорах, учитывающая влияние перераспределения подат-

ливости длинномерных валов по ходу обработки вследствие постоянного изменения соотношения обработанной и обрабатываемых частей заготовок и взаимозависимости упругих деформаций и радиальной составляющей силы резания;

- уточненные математические модели формирования радиальной составляющей силы резания и шероховатости обработанной поверхности, отражающие влияние теплофизических характеристик контактной пары «инструмент-заготовка» на их величину;

- способ управления процессом токарной обработки нежестких деталей, заключающийся в управлении траекторией движения режущего инструмента, путем смещения его в радиальном направлении на величину отжатия элементов системы, при одновременной силовой стабилизации процесса резания, за счет регулирования величины подачи, который позволяет производить обработку на рациональных режимах и обеспечивает повышение точности формы и размеров обработанных деталей типа нежесткий вал и сохранение достигнутой точности во времени;

- структурная и функциональные схемы и алгоритм функционирования двухконтурной системы автоматического управления процессом токарной обработки на станках с ЧПУ;

- программный комплекс для автоматизированного определения радиальной составляющей силы резания и ожидаемой погрешности обработки нежесткого вала исходя из схемы закрепления и режимов обработки, а также для автоматического формирования управляющей программы для системы ЧПУ исходя из требований, предъявляемых к точности обработки.

Достоверность результатов исследований обеспечивается применением метрологически обеспеченных средств измерения, корректным использованием апробированных методик планирования и проведения экспериментов и математического анализа их результатов, и подтверждается высокой сходимостью разработанных математических моделей с экспериментальными данными и их согласованностью с основными положениями технологии машиностроения и теории резания, воспроизводимостью результатов экспериментов, а также результатами проведения производственных испытаний.

Апробация результатов работы. Основные научные и практические результаты диссертации докладывались на 14 Международных, Всероссийских и Региональных научных и научно-практических конференциях: ежегодных региональных конференциях молодых исследователей Волгоградской области (Волгоград, 2013...2017 гг.), "Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий ИНФО-2013" (Сочи, 2013 г.); "Научные основы стратегии развития АПК и сельских территорий в условиях ВТО" (Волгоград, 2014 г.), "Современные направления теоретических и прикладных исследований 2014" (Одесса, 2014 г.), "Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2015" (Одесса, 2015 г.), "Перспективы развития науки, техники и технологий" (Курск, 2015 г.), "Наукоемкие технологии на современном этапе развития машиностроения ТМ-2016" (Москва, 2016 г.), "Инновационные технологии в машиностроении: от проектирования к производству конкурентоспособной продукции ТМ-2017" (Волгоград, 2017), "Пром-Инжиниринг 2017" (Санкт-Петербург, 2017 г.), "Лидеры перемен: Конкурс научно-исследовательских проектов молодых ученых ЮФО" (Волгоград, 2018 г.), "Научные разработки: вчера, сегодня, завтра 2018" (Минск, 2018), "Пром-Инжиниринг 2019" (Сочи, 2019 г.), а также на ежегодных научно-практических конференциях сотрудников и преподавателей ВолГТУ.

Публикации. По материалам исследования опубликовано 27 научных работ, в том числе 5 статей в научных рецензируемых журналах, включённых в Перечень ВАК при Минобрнауки РФ в качестве рекомендованных для опубликования результатов диссертационных работ, 2 статьи в журналах индексируемых в наукометрической базе данных SCOPUS, 3 статьи в зарубежных журналах, 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений (А – Г). Работа изложена на 145 страницах основного текста (152 страницы, включая приложения), содержит 34 рисунка, 26 таблиц, 154 библиографических наименования.

Глава 1. Анализ проблемы обеспечения требуемой точности токарной обработки нежестких валов и путей её решения. Постановка цели и задач исследования.

В данной главе рассмотрены конструктивные особенности деталей класса нежесткий вал, а также особенности технологии их изготовления, выявлена проблема исследования. Рассмотрены способы повышения эффективности токарной обработки нежестких валов, описанные в литературе и применяемые на производстве. На основе анализа эффективности данных методов выявлено, что одним из наиболее перспективных способов повышения точности является обработка с применением систем автоматического управления (САУ). Произведен анализ существующих систем автоматического управления и процесса токарной обработки, как объекта управления показателями точности и качества обрабатываемых деталей. Исходя из проблемы исследования и выявленных недостатков существующих методов её решения сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

1.1. Характеристика конструктивных особенностей нежестких валов и технологии их изготовления

Детали типа нежесткий вал на сегодняшний день нашли широкое применение в различных областях машиностроения: автомобилестроение, ракетно-космическая отрасль, авиастроение, судостроение, станкостроение, точное приборостроение, инструментальное производство и т.д. Согласно данным о структуре общей трудоемкости машиностроительной продукции, приведенным в работе [56], на долю механической обработки деталей типа вал приходится около 30% от общей трудоемкости механической обработки, что составляет от 10,5% до 15% от трудоемкости всех технологических операций. При этом, если рассматривать структуру выпуска деталей класса вал с точки зрения жесткости, то тип деталей "нежесткий вал" составляет около 40% от общего объема (см. Приложение А). Так, к деталям данного типа относятся все ходовые валы и ходовые винты металлорежущих станков, прессов и других машин, цилиндры, штоки и тяги, оси, гребные валы судов, гибкие и торсионные валы, полуоси

сельскохозяйственных машин и другие аналогичные детали. Кроме того, в машиностроении широко используется различного рода специальные инструменты: длинномерные сверла, борштанги, протяжки и др., которые также могут быть отнесены к типу нежестких валов. Подробная классификация деталей типа нежесткий вал приведена в работе [72].

Несмотря на большое разнообразие конструктивных форм и служебного назначения деталей данного типа, их объединяет одно - их геометрическая форма характеризуется значительным превышением продольных размеров относительно поперечного сечения. С технологической точки зрения критерием для отнесения валов к типу нежестких в общем случае служит отношение длины заготовки к ее диаметру. В случае, если данное соотношение превышает $10 \div 12$ [54, 57], то валы считаются нежесткими. Согласно данным, приведенным в работе [94], до 12 % от выпускаемой продукции по данному признаку может быть отнесено к типу нежестких валов.

Детали типа нежесткий вал в большинстве своем работают при высоких скоростях в условиях действия больших знакопеременных нагрузок и любые отклонения при их изготовлении могут вызывать появление дополнительных вибраций и увеличение динамических нагрузок, что существенно сокращает жизненный цикл изделий в целом [125], поэтому к изготовлению деталей данного типа в большинстве случаев предъявляются высокие требования к параметрам точности размеров, геометрических форм и взаимному расположению поверхностей, а также к качеству поверхностей. Драчевым О.И. [44] на основании чертежей деталей, выпускаемых машиностроительными предприятиями Самарской области был произведен анализ требований, предъявляемых к деталям типа нежесткий вал. Анализ показал, что точность изготовления рабочих поверхностей большинства деталей должна соответствовать $6 \div 9$ качеству, допуск радиального биения поверхностей должен быть в пределах от 0,004 мм до 0,05 мм. В рамках данного исследования был произведен аналогичный анализ требований, предъявляемых к деталям типа нежесткий вал на основании чертежей деталей, изготавливаемых АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» (г. Волгоград). Результаты анализа, представленные на диаграммах на рисунке 1.1, подтверждают предъявление высоких требова-

ний к параметрам точности геометрических размеров, формы и взаимного расположения поверхностей, а также к качеству рабочих поверхностей деталей данного типа. При этом, стоит отметить, что на сегодняшний день наблюдается тенденция к ужесточению допусков на изготовление деталей данного типа.

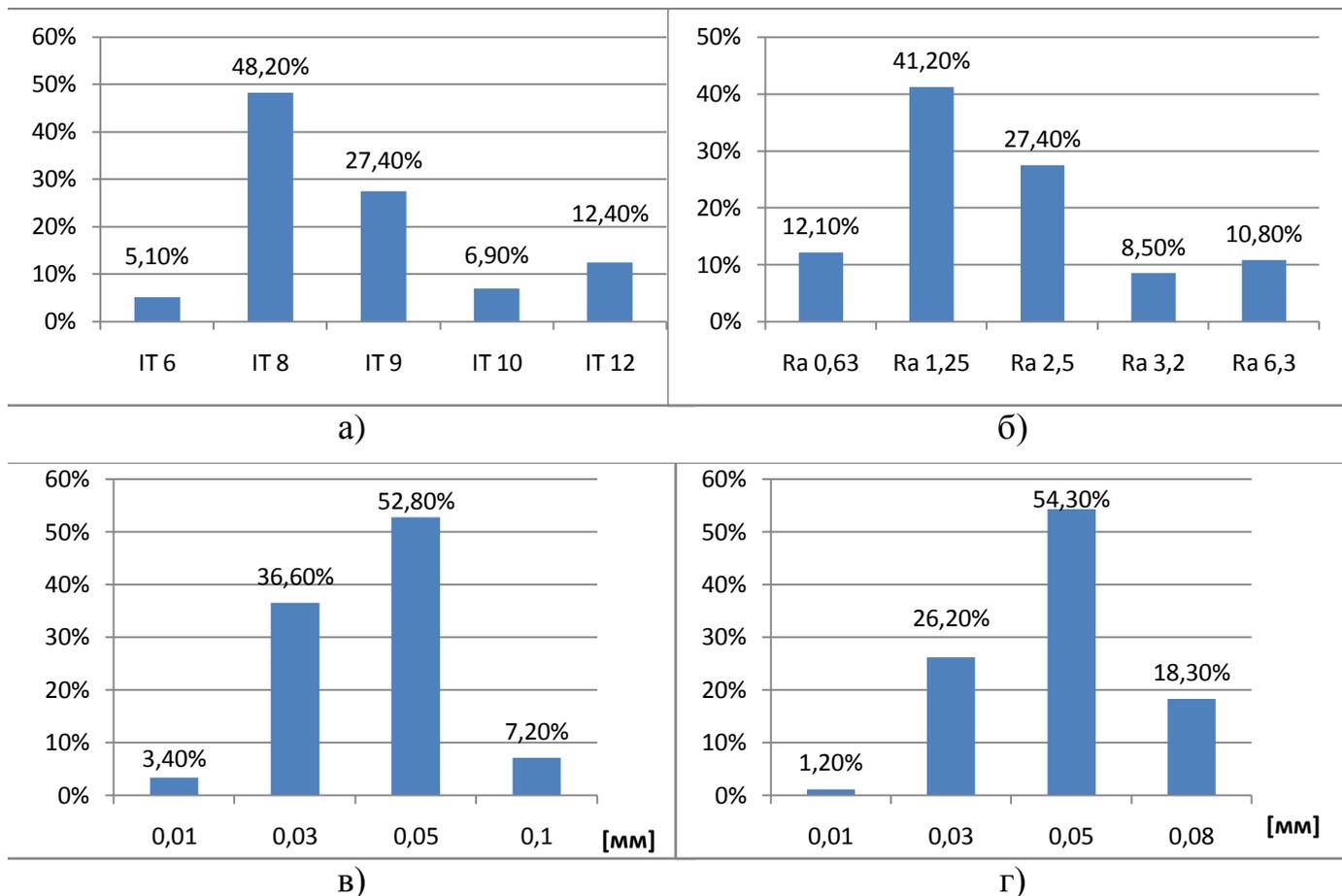


Рис. 1.1. Результаты анализа требований, предъявляемых к деталям типа нежесткий вал на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»: а) по точности размеров; б) по шероховатости рабочих поверхностей; в) по радиальному биению рабочих поверхностей; г) по соосности рабочих поверхностей.

В работах [34, 36, 43, 44] представлены схемы типовых технологических процессов изготовления высокоточных и длинномерных деталей, согласно рекомендациям которых для обеспечения размерной стабильности и высокой точности технологический процесс изготовления деталей данного типа должен строиться по следующей последовательности: после получения заготовок и черновой механической обработки проводится термическая обработка для обеспечения тре-

буемых физико-механических свойств и структурного состояния материала, после которой проводятся операции механической обработки чередующиеся с операциями термической стабилизации. Основными операциями механической обработки являются наружное продольное точение и наружное круглое осциллирующее шлифование. Согласно технологии изготовления точность изготовления на операциях точения должна соответствовать (8 ÷ 11) квалитетам при шероховатости $R_a = (0.63 \div 2.5)$ мкм и (5 ÷ 6) квалитетам при шероховатости $R_a < 0.63$ мкм на операциях шлифования. При этом, наибольшей трудоемкостью облают операции токарной обработки, которые кроме того, за счет эффекта технологической наследственности [132], в значительной степени переопределяют результаты последующих финишных операций. В ряде случаев, исходя из требований чертежа к точности и качеству поверхностей детали, токарная обработка является окончательным видом механической обработки.

Основной технологической особенностью деталей данного типа, затрудняющей достижение требуемой точности обработки, является их значительная податливость, неравномерная по ходу обработки. Вследствие упругих деформаций ось вращения заготовки смещается из исходного ненагруженного положения, таким образом происходит увеличение фактического расстояния до вершины режущей кромки, что приводит к увеличению диаметра в обрабатываемом сечении. В виду непостоянства упругих деформаций данное расстояние также изменяется по всей длине обработки, в результате чего обработанные детали получают искажение формы, проявляющееся в общем случае в виде бочкообразности [44, 57]. В работах [27, 44, 91] представлены теоретические и практические исследования процесса обработки нежестких валов, которые доказали доминирующее влияние упругих деформаций технологической системы, в особенности упругих отжатий детали, на величину погрешности обработки как при черновом, так и получистовом и чистовом точении. Величина погрешности, обусловленной данным воздействием, при точении деталей данного класса достигает 80 – 90% от общей погрешности обработки [91]. При этом, величина упругих отжатий детали на при черновой обработке может превосходить заданный допуск на обработку. Кроме того, колебание припуска, характеристик материала заготовок, величин деформаций элементов

технологической системы, температуры, износа инструмента и других неконтролируемых возмущающих воздействий в процессе обработки также негативно влияет на точность и качество обработки [9, 15, 16]. Поэтому на практике для обеспечения требуемой точности обработки нежестких валов применяют различные технологические методы и приемы, которые рассмотрены далее.

Другой проблемой при изготовлении нежестких валов является их коробление как в процессе обработки, так и при хранении, вызванное перераспределением остаточных напряжений [19, 44, 97]. Причины возникновения остаточных напряжений разнообразны: неоднородность силовых воздействий и температурного поля, фазовые превращения и т.д. После освобождения детали от внешних связей происходит релаксация остаточных напряжений и деталь принимает новое равновесное напряженно-деформированное состояние в результате чего искажается её профиль относительно исходного состояния. Так, в работе [34] представлены результаты исследования изменения точности формы и взаимного расположения поверхностей шпинделей координатно-расточного станка мод. 2A450 и резьбошлифовального мод. 5822 с течением времени. Согласно приведенным данным после механической обработки была получена партия годных деталей с точностью диаметральных размеров порядка 1...2 мкм, в то время как за 5 месяцев испытаний зарегистрировано изменение диаметральных размеров в десятки микрометров. Кроме того, за время испытания было зафиксировано возникновение значительной по величине стрелы прогиба деталей (порядка 40 мкм), что свидетельствует о значительном влиянии коробления в результате перераспределения остаточных напряжений на конечную точность деталей.

Аналогичные выводы по результатам исследования фактического качества изготовления нежестких деталей, изготавливаемых предприятиями Самарской области, сразу после механической обработки и спустя 24-36 часов после изготовления были получены в работе [44]. При этом процент брака по результатам изменения радиального биения поверхностей спустя 24-36 часов составил от 64% до 78% для различных предприятий.

Также, наличие остаточных напряжений играет отрицательную роль и в процессе эксплуатации: остаточные напряжения, имеющиеся в детали, суммируются

с напряжениями, создаваемыми под действием внешних сил, в результате чего суммарные напряжения могут превысить предел упругости, что приведет к пластической деформации детали. Кроме этого, наличие остаточных напряжений растяжения негативно влияет на усталостную прочность и износостойкость изделий.

Таким образом, проблема получения требуемой точности формы и размеров длинномерных валов неразрывно связана со снижением уровня и общей стабилизацией остаточных напряжений в детали. Для решения данной проблемы был разработан ряд методов, которые можно разделить на три основные группы [44]:

- первая группа направлена на снижение общего уровня остаточных напряжений: различные виды термообработки (отжиг, искусственное старение, отпуск и т.д.), а также технология получения заготовок с регулированием скорости охлаждения;
- вторая группа направлена на стабилизацию напряженного состояния при незначительном снижении уровня остаточных напряжений (естественное старение, старение термоударами, вибростарение);
- к третьей группе относятся методы, позволяющие путем регулирования технологических факторов уменьшить моменты неуравновешенных внутренних сил и температурных полей, возникающих при механической обработке, обеспечивая тем самым равномерность возникающих остаточных напряжений.

Первая и вторая группы достаточно часто применяются на практике и широко освещены в литературе. К недостаткам данных методов стоит отнести то, что после их проведения, заготовка с неравномерными остаточными напряжениями меняет свою форму и размеры. Также, стоит отметить, что качество проведения термообработки существенно зависит от скорости и равномерности охлаждения после отпуска. Так, при остывании заготовки возможно наведение новых остаточных напряжений и, как результат, дополнительное искривление оси заготовки («поводка»). При этом, для деталей малой жесткости искривление оси заготовки может быть столь значительным, что его невозможно будет исправить при дальнейшей механической обработке. Так например, в работе [44] отмечено, что после операции получистового шлифования оправок повышенной технологической надежности, радиальное биение обработанных поверхностей партии деталей состав-

ляло от $0,03 \div 0,05$ мм, а после проведения термического старения, величина биения увеличилась практически в 3 раза до $0,08 \div 0,15$ мм.

Особый интерес составляет третья группа методов уменьшения степени влияния остаточных напряжений на точность обработки. Для данной группы методов проблема снижения влияния остаточных напряжений рассматривается как задача их стабилизации и минимизации непосредственно в процессе обработки.

1.2. Анализ способов обеспечения требуемой точности и качества токарной обработки нежестких валов

Учитывая технологические особенности обработки нежестких валов, в литературе [6, 8, 9, 17, 24, 27, 43, 44, 57, 58, 72, 91, 92, 97, 109] рекомендован ряд способов обеспечения требуемой точности и качества обработки.

1.2.1. Обработка на заниженных режимах и многопроходная обработка

Одно из традиционных направлений обеспечения требуемой точности обработки предполагает выбор технологических режимов и условий обработки исходя из прогнозирования его результатов. При этом проектирование технологического процесса и назначение режимов резания в первую очередь осуществляется не исходя из рекомендаций по обработке того или иного материала или технологических возможностей оборудования, а исходя из прогнозируемой точности.

В соответствии с данным подходом как правило применяется многопроходная обработка с постепенным уменьшением глубины резания. Достижение требуемой точности размеров и формы детали обеспечивается за счет снижения сил резания, и, как следствие, уменьшения упругих деформаций элементов технологической системы. Недостатком данного метода является то, что чем более высокую точность требуется обеспечить, тем большее количество проходов и различных станков для этого необходимо задействовать. Данный метод хорошо зарекомендовал себя при обработке жестких деталей, когда технологическая система обладает достаточно высокой

степенью равномерности податливости, но при обработке нежестких валов практически не обеспечивает получения требуемого результата.

При обработке нежестких валов, в связи с высокой податливостью заготовки и склонностью к возникновению вибраций в процессе обработки, существенно возрастает значение правильности выбора режимов резания [72]. Так, в практике машиностроения для обеспечения устойчивости процесса резания рекомендуется смещать диапазон режимов обработки в сторону снижения скорости резания (для снижения вибраций) или подачи (для силовой стабилизации процесса). Варьированием режимов обработки в некоторых случаях получается добиться большей стабильности обработки и повышения её точности, но при этом происходит значительная потеря производительности. Также, обработка на заниженных режимах при обработке нежестких валов высокой точности имеет ограниченное применение в виду необходимости чрезмерного снижения режимов, в том числе и за пределы зоны наростообразования. Кроме этого, стоит отметить, что эффективность намеченного технологического процесса и режимов обработки в значительной степени зависит от точности прогноза характеристик заготовок, инструмента и состояния оборудования, которые сложно оценить в условиях производства. Таким образом, применение данной группы методов не обеспечивает высокой производительности и не может в достаточной мере обеспечить стабильность результатов обработки.

1.2.2. Повышение точности и жесткости технологической системы

Другим традиционным направлением обеспечения заданной точности является увеличение жесткости технологической системы за счет повышения точности изготовления отдельных узлов и деталей станка. Получаемый при этом эффект достигается за счет уменьшения ошибок взаимного расположения инструмента и обрабатываемой детали в процессе обработки, а также уменьшения деформаций узлов станка под действием сил резания [72, 67]. Однако увеличение жесткости узлов станка при обработке нежестких валов зачастую приводит не к повышению, а

к снижению точности обработки [42, 91], что объясняется увеличением степени неравномерности жесткости технологической системы.

В виду того, что при токарной обработке нежестких валов наибольшей податливостью в технологической системе обладает заготовка, возникает необходимость создавать условия для повышения её жесткости. С этой целью в систему вводят дополнительные опоры в виде неподвижных или подвижных люнетов различной конструкции, увеличивающих её жесткость [17, 57, 109]. В случае обработки очень длинных заготовок ($l/d > 30$), в зависимости от требуемой точности применяют два и более люнетов. Однако несмотря на свою эффективность в плане увеличения жесткости системы, данный технологический прием требует индивидуального подхода при обработке каждой детали и значительно повышает трудоемкость её изготовления. Так, под установку неподвижных ручных трехточечных люнетов на низких режимах резания предварительно протачивают технологические шейки (рис. 1.2 а) с высокой степенью точности и качества обработанной поверхности или производят установку и выверку подлюнетных муфт на заготовке в местах установки люнетов (рис. 1.2 б), после чего производят выверку положения детали в горизонтальной и вертикальной плоскостях с биением не более $0,03 \div 0,05$ мм в зависимости от требуемой точности обработки. Необходимость подготовки установочных поверхностей обусловлена тем, что погрешности установки люнетов копируются на детали при их обработке. Процесс выверки положения заготовки значительно усложняется при установке двух и более люнетов.

Более производительной альтернативой применения трехточечных ручных люнетов может являться обработка с применением люнетов вертлюжного (кольцевого) типа (рис. 1.2 в), так как они для своего применения не требуют дополнительной предварительной обработки заготовки, но необходимость выверки её положения в горизонтальной и вертикальной плоскостях сохраняется. Кроме того, при установке заготовок в неподвижных ручных люнетах как трехточечного, так и вертлюжного типа, отсутствует возможность обработки участка, находящегося непосредственно в корпусе люнета, поэтому обработку ведут с переустановкой люнетов, что также приводит к увеличению трудоемкости.

Данного недостатка лишена обработка с применением ручного подвижного люнета (рис. 1.2 г). Механическая обработка нежестких валов с применением подвижных люнетов сопровождается значительным повышением и выравниванием жесткости заготовки, поскольку опорные элементы люнета располагают в непосредственной близости к зоне резания [45, 64]. Однако применение данного типа люнета также требует наличия заранее подготовленной поверхности под его установку, а также сопровождается трудоемкой переналадкой при переходе на другой диаметр обработки.



а)



б)



в)



г)

Рис. 1.2. Примеры применения ручных люнетов различного типа: а) установка трехточечного неподвижного люнета на технологическую шейку; б) установка трехточечного неподвижного люнета через подлюнетную муфту; в) общий вид люнета вертлюжного (кольцевого) типа; г) обработка с применением подвижного люнета.

Таким образом, применение всех вышеперечисленных типов люнетов, несмотря на их достоинства, малоэффективно, так как не отвечает требованиям автоматизации.

Другим видом люнетов получивших широкое применение при обработке нежестких валов являются самоцентрирующие люнеты (рис. 1.3 а). Их применение более эффективно с точки зрения автоматизации, так как центрирование детали происходит автоматически за счет силового замыкания взаимосвязанных роликов, что позволяет базировать деталь по её образующей поверхности. В работе [6] представлены данные по исследованию эффективности применения самоцентрирующихся люнетов, согласно которым за счет применения системы из двух самоцентрирующих люнетов при токарной обработке вала диаметром 22 мм и длиной 400 мм величину смещения оси удалось снизить в $4\div 10$ раз по сравнению с обработкой без люнетов и добиться непрямолинейности оси вала в пределах $8\div 10$ мкм с одновременным уменьшением отклонения от круглости после чистовой обработки в $2\div 4$ раза.

Однако при оценке эффективности применения самоцентрирующих люнетов необходимо учитывать явление накатывания на установочных поверхностях под роликами люнетов (рис. 1.3 б). По данным, приведенным в работе [6], глубина накатывания в зависимости от силы прижатия (давления в гидроцилиндре) меняется от 0,002 до 0,05 мм. Практический опыт использования самоцентрирующих люнетов на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» показал, что при длительном процессе токарной обработки с использованием люнетов данного типа глубина накатывания может достигать $0,1\div 0,15$ мм. С одной стороны, накатывание уменьшает погрешность установки и способствует центрированию заготовки около теоретического центра самоцентрирующего люнета, но с другой стороны, в ряде случаев, накатывание на чистовой поверхности недопустимо.

Другим способом обеспечения требуемой точности механической обработки нежестких деталей является обработка с применением самоцентрирующих суппортов с двумя резцами [53, 82], однако данный метод требует значительных затрат времени на настройку сложных в изготовлении суппортов. Теми же недос-

татками обладают способы обработки валов многоинструментальной головкой [2], и блоком резцов [1]. Кроме того, многорезцовая обработка не учитывает влияние необрабатываемых частей нежесткого вала, в которых накапливается значительная кинетическая энергия, в результате чего в процессе обработки возникают значительные вибрации, снижающие его точность.



Рис. 1.3. Пример обработки с самоцентрирующимся люнетом: а) общий вид люнета, установленного на станке; б) проявление явления накатывания поверхности роликами самоцентрирующих люнетов на детали.

Таким образом все известные способы обеспечения требуемой точности за счет повышения точности и жесткости технологической системы связаны со значительным увеличением трудоемкости обработки и требуют индивидуального подхода при обработке каждой детали, вследствие чего не могут гарантировать в достаточной мере стабильности результатов обработки.

1.2.3. Комбинированные методы обработки

Одним из перспективных методов обеспечения требуемой точности обработки нежестких валов является метод, при котором для снижения погрешности, вносимой температурными деформациями, к заготовке во время обработки прикладывают осевое растягивающее усилие [78, 79, 116]. За счет растяжения заготовки также умень-

шается и ее прогиб, однако полностью он не устраняется. Только при приложении растягивающих усилий стремящихся к бесконечности можно полностью устранить прогиб заготовки, однако допустимых их величина ограничена прочностью заготовки, узлов станка и элементов захватного устройства. Другим недостатком метода является необходимость использования сложных захватных устройств: задних бабок специального исполнения, контр-шпинделей и т.д. К тому же, применение данного метода, согласно [6], эффективно при обработки нежестких валов наружным диаметром не более 16 мм, в противном случае потребуется приложение значительных растягивающих усилий.

Кроме того, проблема повышения точности обработки решается за счет наложения дополнительных вибраций на инструмент или заготовку путем введения дополнительного упругого элемента в систему [80, 92, 151]. При этом на операциях черновой обработки за счет наложения низкочастотных осевых колебаний можно добиться эффективного стружкодробления, а на чистовых операциях, за счет наложения высокочастотных низкоамплитудных тангенциальных колебаний - обеспечения улучшения показателей точности и шероховатости обработки [92]. В результате экспериментальных исследований [13, 58, 92] было установлено, что при вибрационном резании величина составляющих силы резания снижается на 15÷30% по сравнению с традиционным резанием, что положительно сказывается на точности обработки и стойкости инструмента. Однако, при использовании данного метода, стоит учитывать влияние дополнительных погрешностей, связанных со включением в технологическую систему нового элемента - вибратора, а также сложность определения амплитуды и частоты колебаний, наложение которой позволило бы повысить эффективность обработки. Кроме того, применение данного метода в основном обеспечивает повышение точности формы в поперечном сечении, и лишь частично, за счет снижения и стабилизации силы резания, обеспечивает повышение точности формы нежестких валов в продольном направлении.

Другим весьма эффективным методом обеспечения заданной точности обработки является комбинированная обработка, совмещающая процесс резания с поверхностным пластическим деформированием. Накатник может быть установлен как перед

зоной резания для создания благоприятных условий для обработки [20, 48, 74], так и после зоны обработки [3, 12, 84], за счет чего повышается твердость поверхностного слоя обработанной поверхности, формируются более равномерные остаточные напряжения в детали, повышается точность размеров в поперечном сечении и снижается шероховатость обработанной поверхности. Согласно данным, приведенным в работе [11], за счет применения данного метода обработки можно обеспечить получение точности обработки длинномерных валов по 7÷8 качеству точности и шероховатости в пределах Ra 0,08÷0,16 мкм, а также добиться существенного снижения коробления деталей после обработки за счет значительного выравнивания остаточных напряжений. Кроме того, накатник в процессе обработки также выполняет роль дополнительной опоры, что частично повышает жесткость технологической системы и, как следствие, точность продольного профиля обработанной детали. К недостаткам данного метода можно отнести сложность в согласовании режимов обработки резанием и процесса упрочнения; сложность настройки накатников на требуемое усилие и необходимость поддержания усилия на постоянном уровне при изменении размера детали, происходящем в результате износа режущего инструмента.

1.2.4. Обработка с применением систем автоматического управления

В настоящее время широкое распространение получила обработка с применением систем автоматического управления (САУ) [8, 9, 51, 117]. При функционировании данных систем для обеспечения необходимых результатов обработки используются те же самые физические явления, что и при традиционных методах обработки, однако по сравнению с традиционными методами, для которых исходными данными о процессе резания являются усреднённые справочные характеристики, исходными данными для САУ служат значения параметров, измеренные в реальный момент времени в процессе обработки, что значительно повышает эффективность применения данного метода.

За счет автоматического управления в металлообработке осуществляется как программное управление рабочими органами в процессе обработки, так и адаптивное управление процессом резания [86]. При этом, адаптация предполагает либо

поддержание какого-либо управляемого параметра процесса (например силы резания, скорости резания и т.д.) на заранее заданном уровне (адаптивные системы предельного регулирования *adaptiv control with constraint* - АСС), либо поддержание какого-либо критерия процесса на оптимальном уровне, исходя из экстремума заданной оценочной функции процесса металлообработки (адаптивные системы оптимизации *adaptiv control for optimal* - АСО) [88]. Для контроля величины параметра, характеризующего ход технологического процесса, технологическую систему оснащают различными датчиками (тензорезисторы, индуктивные, емкостные датчики и др.) и преобразователями. Поправки вносятся при помощи действия различных исполнительных механизмов уже имеющихся в технологической системе или специально встраиваемых с этой целью.

Применение систем автоматического управления решает широкий спектр технологических задач: повышение производительности черновой обработки [119, 133, 142], повышение размерной точности обработки, повышение качества поверхностного слоя деталей [87, 137], повышение стойкости режущего инструмента [9, 98], снижение себестоимости обработки и т.д. Действие системы, в зависимости от поставленной цели, может быть направлено на оптимизацию режимов резания, исходя из заранее заданного критерия оптимизации, или на минимизацию влияния одного или одновременно нескольких факторов, вызывающих появление погрешностей при обработке (износ режущего инструмента, тепловые деформации элементов технологической системы, упругие деформации технологической системы, вибрации в процессе резания, неточность настройки станка и т.д.).

Как уже отмечалось ранее, наибольшее влияние на точность и качество обработки при точении нежестких валов оказывают упругие деформации элементов технологической системы. Поэтому, в контексте данной работы интерес представляют системы автоматического управления, направленные на повышение точности диаметральных размеров, формы и взаимного расположения поверхностей деталей путем стабилизации и минимизации влияния упругих деформаций технологической системы. Также, существенное влияние на точность обработки оказывает и износ инструмента, однако, данному направлению посвящено достаточно большое количество работ как

отечественных, так и зарубежных авторов, и достигнуты значительные результаты [9; 98, 134, 135]. Кроме того, современные импортные станки с ЧПУ, в частности таких производителей как Haas Automation (США), Spinner (Германия) и др., оснащаются системами мониторинга состояния режущего инструмента, основанными на анализе уровня потребляемой мощности двигателей шпинделя (или двигателя подач) или на высокочастотном анализе вибраций, возникающих при резании, а также функцией компенсации износа инструмента в процессе обработки.

1.2.4.1. Обзор существующих систем автоматического управления

Как известно, величина упругих деформаций зависит от величины силы резания, возникающей в процессе обработки, и жесткости элементов технологической системы. Возникающие в процессе обработки упругие деформации элементов технологической системы приводят к постоянному изменению расстояния между вершиной режущей кромки инструмента и осью вращения заготовки, что приводит к изменению диаметра детали в обрабатываемом сечении. Таким образом, обеспечить требуемую точность обработки можно путем управления силовыми параметрами процесса резания, управления жесткостью элементов технологической системы или стабилизацией расстояния между обрабатываемой деталью и режущим инструментом.

Наиболее простым и универсальным способом управления упругими деформациями технологической системы является метод, заключающийся в управлении силовыми параметрами процесса резания. Так как величина силы резания напрямую зависит от параметров процесса резания, следовательно, регулировать её можно путем изменения любого из них. Наиболее широкое распространение в виду своей высокой эффективности получили системы автоматического управления, в которых силовая стабилизация процесс разевания осуществляется за счет регулирования величины продольной подачи [6, 9, 85]. Принцип действия данных систем заключается в следующем: при отклонении величины силы резания от номинального предустановленного значения, система автоматического управления регулирует величину про-

дольной подачи до тех пор пока величина силы резания не достигнет номинального значения. Стабилизировать силу резания можно также путем регулирования скорости резания или геометрии резания (переднего, заднего и других углов), однако первый способ связан с необходимостью изменения параметра регулирования в широких пределах что, в свою очередь, негативно сказывается на размерной стойкости инструмента, а изменение геометрии резания приводит к изменению размера статической настройки, вследствие чего возрастает погрешность обработки в продольном направлении детали [9].

Согласно данным, приведенным в работе [4], за счет применения системы автоматического управления, принцип действия которой направлен на силовую стабилизацию процесса резания за счет регулирования величины подачи, при обработке заготовок диаметром 40 мм и длиной заготовки 400 мм максимальную продольную погрешность удалось снизить в четыре раза (с 0,34 до 0,085 мм) по сравнению с традиционной обработкой. Вместе с тем, было достигнуто существенное повышение производительности обработки за счет возрастания средней подачи с 0,3 до 0,43 мм/об. Кроме того, за счет силовой стабилизации процесса резания можно добиться не только повышения размерной точности обработки, но и повышения качества поверхностного слоя обработанных деталей, в частности - значительного снижения и выравнивания величины остаточных напряжений. Так, в работе [9] представлены данные по величине остаточных напряжений, возникающих при обычной токарной обработке заготовок из конструкционных сталей с колебанием припуска в пределах 2 мм (изменение глубины от 1 до 3 мм на сторону) и при их обработке с применением системы автоматического управления, обеспечивающей силовую стабилизацию процесса резания. Согласно приведенным данным, колебание величины остаточных напряжений при обычной токарной обработке на участках деталей с разным припуском составляло 58,8—117,6 Н/мм², причем на участках с минимальной глубиной резания величина остаточных напряжений была минимальной и составляла 362,2 Н/мм², а на участках с большим припуском напряжения увеличивались. Одновременно с этим, при обычной обработке на поверхности детали возникали микронадрывы и микро-

трещины, наблюдалась неоднородность структуры. По результатам обработки с применением системы автоматического управления, величина остаточных напряжений в поверхностном слое оставалась практически постоянной и равной $362,6 \text{ Н/мм}^2$ и лишь только в некоторых деталях из серии было зафиксировано отклонение в пределах $9,8 - 29,4 \text{ Н/мм}^2$. При этом полученная структура была более равномерная и практически отсутствовали микронадрывы и микротрещины. Также было отмечено, что при использовании системы автоматического управления силовым режимом была зафиксирована стабилизация глубины и степень наклепа в пределах 10%, в то время как при традиционной обработке их колебание составляло от нескольких десятков до сотен процентов в зависимости от припуска.

Существенным недостатком систем автоматического управления, действие которых направлено на силовую стабилизацию силового параметра процесса резания за счет регулирования величины подачи, представленных в работах [4, 9] и других подобных систем, является то, что они по сути - самостоятельные объекты с аппаратным управлением и, из-за наличия собственных исполнительных механизмов и большого количества связующих звеньев, не могут быть установлены на станках с ЧПУ с сохранением возможности автоматической смены инструмента, что существенно снижает технологические возможности оборудования [70]. Кроме того их установка требует внесения существенных изменений в конструкцию станка. Однако, наиболее эффективно применение систем адаптивного управления именно на станках с ЧПУ, так как многие узлы станков, такие как бесступенчато-регулируемые приводы подачи и главного движения и PLC-контроллеры системы ЧПУ при некоторой модификации могут быть использованы в качестве исполнительных механизмов [88].

В работе [81] представлена система адаптивного управления точностью токарной обработки деталей на станках с ЧПУ за счет силовой стабилизации процесса резания, путем одновременного программного регулирования величины подачи и скорости резания. В отличие от рассмотренных ранее систем, в качестве исполнительного органа в данной системе используется привод подачи станка, что обеспечивает возможность её использования на станках с ЧПУ без необходимости внесения изменений в конструкцию станка. Величина необходимой корректировки режимных па-

раметров рассчитывается в автоматизированном режиме по заранее заданному алгоритму исходя из данных полученных от датчика силы. В основу алгоритма функционирования данной системы заложена модель расчета силы резания, предложенная в работе [104]. Однако, согласно [89], ошибка при расчете силы резания по методике, приведенной в работе [104], а также при расчетах по другим аналогичным методикам, в силу некорректного учета в них свойств контактируемой пары инструмент-заготовка, может превышать 200% по сравнению с экспериментальными данными, полученными при различных условиях обработки. Кроме того, данные методики предполагают использование большого числа справочных коэффициентов и требуют проведения предварительных расчетов, что затрудняет использование этих формул в алгоритмах функционирования САУ.

Также, стоит отметить, что режимные параметры процессе резания оказывают влияние не только на величину силы резания, но и на величину получаемой шероховатости. При этом, при функционировании систем управления, регулирование режимными параметрами процесса резания осуществляется в достаточно широком диапазоне, в результате чего значительно меняется и шероховатость обработки. Таким образом, общим недостатком существующих систем автоматического управления точностью путем силовой стабилизации процесса резания за счет регулирования режимных параметров является значительная неравномерность шероховатости обработанных поверхности как в партии деталей, так и на различных участках каждой обработанной детали. Данное ограничение весьма существенно при чистовой обработке деталей с высокими показателями шероховатости.

Для решения вышеуказанного недостатка была предложена систем автоматического управления точностью путем силовой стабилизации процесса за счет наложения на режущий инструмент управляемых высокочастотных колебаний [9]. Для этого на токарный станок вместо стандартного резцедержателя устанавливается исполнительный механизм, представляющий собой резец с магнитострикционным преобразователем электрических колебаний в механические. Силовая стабилизация процесса резания в данной системе осуществляется за счет изменения частоты и амплитуды налагаемых на инструмент колебаний. За счет

применения данной САУ при различных режимах резания было достигнуто повышение точности формы обработанной детали в поперечном сечении в среднем на 30,2% по сравнению с традиционной обработкой. Главным преимуществом данного способа управления является его высокое быстродействие (порядка 0,01...0,0001 секунды), а также улучшение шероховатости в среднем на 1-2 класса после обработки в сравнении с традиционным точением. Недостатком применения данного метода управления является отсутствие точной математической взаимосвязи между характеристиками колебаний и силой резания, а также возможность регулирования силы резания в небольшом диапазоне по сравнению с регулированием за счет изменения подачи. Кроме того, использование данного метода также предполагает изменения конструкции станка путем замены стандартного резцедержателя, что недопустимо в современных условиях обработки.

Все ранее рассмотренные системы достаточно эффективно работают при обработки достаточно жестких заготовок малой длины. При обработке же нежестких длинномерных валов, данные системы недостаточно эффективны, так как в своей работе никак не учитывают влияние непостоянства податливости технологической системы на точность обработки, вследствие чего обработанные нежесткие детали имеют ярко выраженную бочкообразность, хоть и меньшую по величине, чем при обработке без применения САУ.

В случаях, когда требуется обеспечение высокой точности формы продольного сечения, а шероховатость обработанной поверхности выбрана лимитирующим фактором, например при чистовой обработке, управление точностью обработки осуществляют за счет изменения жесткости одного или нескольких элементов технологической системы [4]. В этом случае компенсация упругих деформаций технологической системы осуществляется за счет изменения упругого перемещения замыкающего звена, жесткость которого меняется. Для этого в кинематические цепи станка встраивают специальные демпфирующие устройства [9], а также вводят в технологическую систему дополнительные элементы с переменной в процессе обработки жесткостью, в частности гидравлические самоцентрирующиеся люнеты [38]. Данный способ управления имеет достоинства, заключающиеся в существенном вырав-

нивании жесткости технологической системы и, как следствие, возможности достижения высоких показателей точности формы обработанных поверхностей, а также в получении значительной однородности шероховатости обработанных поверхностей. Однако, данный метод не обеспечивает силовой стабилизации процесса резания, вследствие чего в обработанной детали возникают неравномерные остаточные напряжения, приводящие к последующему её искривлению.

Еще одним способом повышения точности диаметральных размеров и формы детали в продольном сечении является управление расстоянием между обрабатываемой деталью и режущим инструментом. При реализации данного способа, траектория движения режущего инструмента формируется не только исходя из геометрической формы готовой детали, как это реализовано в копировальных станках, а с учетом упругих деформаций технологической системы. В процессе обработки суппорт с инструментом перемещается в поперечном направлении на величину требуемой в каждый момент времени поправки для компенсации погрешности обработки вызывной упругими деформациями элементов технологической системы [72]. В этом случае управляющим воздействием является траектория движения режущего инструмента. Применение данных систем, помимо повышения точности диаметральных размеров и формы детали в продольном сечении, позволяет и в значительной степени стабилизировать силовой параметр процесса резания за счет обеспечения постоянства глубины резания вследствие обеспечения постоянства расстояния между фактической осью детали и режущей кромкой инструмента.

В зависимости от способа внесения поправки различают:

- программное управление, при котором перемещение суппорта осуществляется по заранее заданной программе;
- управление по измеряемому отклонению, при котором перемещение суппорта осуществляется на основании данных, полученных при сравнении измеренного фактического расстояния с заранее заданной номинальной величиной.

В работе [68] представлена система управления продольным профилем нежесткого вала за счет управления расстоянием между обрабатываемой деталью и режущим инструментом по измеряемому отклонению при помощи копира. Ин-

формация о требуемом отклонении в данной системе задается исходя из отклонений диаметров в партии деталей, обработанных на данном станке, измеренных в различных сечениях вне станка. В результате измерений получают семейство кривых диаметров обработанных деталей, которое аппроксимируется в полином пятого порядка по методу наименьших квадратов, затем определяется систематическая составляющая погрешность обработки. Выявленную систематическую погрешность обработки компенсируют за счет корректировки профиля копира. Данная система достаточно эффективна, однако сложна в своей реализации, так как требует постоянной корректировки профиля копира, а также предварительной обработки партии деталей для получения начальных статистических данных. Таким образом, данный метод не применим для условий единичного производства.

Информация о величине требуемой корректировки может быть получена и на основании контроля значения диаметра обрабатываемой детали в зоне резания путем оптического измерения [83]. Однако, данный способ измерения не является достаточно точным, в виду существенного влияния вибраций в зоне резания на точность измерения. Кроме того, при реализации данного метода существенное влияние на эффективность обработки оказывает транспортное запаздывание объекта управления, возникающее из-за отставания во времени процесса обмера и введения корректировки в технологическую систему.

В работе [118] представлен программный комплекс для автоматической корректировки траектории движения режущего инструмента в процессе токарной обработки на станках с ЧПУ. Стоит отметить, что в качестве исполнительного органа, для внесения корректировки, в данном случае используется привод подачи станка, что обеспечивает возможность его использования на станках с ЧПУ без необходимости внесения изменений в их конструкцию. При этом за счет возможности системы ЧПУ осуществлять предпросмотр кадров, была решена проблема транспортного запаздывания системы. Проведение обработки с применением коррекции позволило автору добиться уменьшения максимальной погрешности профиля заготовки с 0,17-0,24 мм до 0,05-0,08 мм и повысить точность обработки нежестких валов на 67-70 % при обработке заготовок из Стали 3 диаметром 21 мм и длиной 240 мм.

Величина необходимой корректировки траектории движения в данной системе автоматического программного управления рассчитывается в автоматизированном режиме по заранее заданному алгоритму, исходя из ожидаемых в процессе обработки упругих деформаций нежесткого вала, определяемых по предложенным автором математическим моделям. Однако, анализ математических моделей, представленных в работе, и других принятых в технологии машиностроения моделей [59, 91], описывающих механизм возникновения упругих деформаций в процессе обработки, показал, что в них не учитывается перераспределение податливости длинномерных валов по ходу обработки в следствии постоянного изменения соотношения обработанной и обрабатываемых частей заготовок [10]. Данное обстоятельство указывает на целесообразность создания более совершенной модели процесса упругой деформации нежесткого вала обрабатываемого в опорах.

Общим недостатком систем автоматического управления точностью, принцип действия которых основан на управлении расстоянием между обрабатываемой деталью и режущим инструментом, является то, что они в процессе своего функционирования ни как не учитывают колебание припуска и характеристик материала заготовок, которые могут быть весьма существенны при черновой и полуконусной обработке.

Таким образом, ни один из рассмотренных методов в отдельности не обеспечивает высокой эффективности при обработке нежестких валов, в связи с чем появился целый ряд систем, имеющих несколько контуров управления, принцип действия каждого из которых основан на одном из представленных методов.

В работе [97] представлена трехконтурная система автоматического управления, предназначенная для повышения точности обработки нежестких валов:

- первый контур, обеспечивающий точность обработки в поперечном направлении (стабилизацию глубины резания), состоящий из датчика перемещений, установленного на номинальный зазор между пятой резца и микрометрическим винтом (т.е. на номинальную глубину резания), усилителя сигнала, полосового фильтра, блока сравнения, блока формирования управляющего сигнала, электро-

механического преобразователя сервоклапана и связанного с ним гидропривода осуществляющего регулирование положения вершины резца;

- второй контур, предназначенный для стабилизации переменной составляющей силы резания за счет регулирования величины подачи, состоящий из датчика перемещений, необходимого для измерения величины силы резания, усилителя сигнала полосового фильтра, блока сравнения, блока формирования управляющего сигнала, сумматора, электромеханического преобразователя, сервоклапана и связанного с ним гидропривода осуществляющего регулирование величины подачи.

- третий контур, предназначенный для контроля за продольными перемещениями суппорта и необходимый для предотвращения ухода инструмента из зоны резания вследствие регулирования величины подачи вторым контуром управления.

Таким образом, устройство при своей работе обеспечивает стабилизацию положения режущего инструмента относительно выбранной базы и стабилизацию величины силы резания, что способствует формированию в поверхностном слое детали равномерных остаточных напряжений и сохранению точности формы деталей в процессе хранения и эксплуатации. Данная система весьма эффективно работает совместно с самоцентрирующими люнетами, выравнивающими и увеличивающими жесткость заготовки. За счет их совместного применения автором было достигнуто уменьшение максимального отклонения от цилиндричности и круглости поверхностей детали в 2...4 раза и увеличение точности обработки по диаметру в 3...3,5 раза по сравнению с обработкой без применения САУ. Но устройство имеет и ряд недостатков. Во-первых, для его реализации необходимо изготовление специальной резцовой головки с динамометрическим рычагом и датчиком перемещений, устанавливаемой на суппорт станка вместо стандартной резцовой головки, что делает невозможным использование данной системы на станках с ЧПУ. Вторым недостатком данной системы является использование в качестве привода механизма малых перемещений гидропривода, что влечет за собой зависимость величины перемещений инструмента от колебаний давления в гидроприводе, вызванных изменениями температуры рабочей жидкости. Также, использование гидропривода не позволяет достичь высокого быстродействия системы. Кроме того, данная система достаточно сложна в настройке [85].

Значительный интерес представляет многосвязная система управления силой резания и положением резца по поперечной оси, представленная в работе [55]. Данная система состоит из двух контуров управления. Первый контур является комбинированным каскадным и включает в себя прямой канал управления для компенсации систематической составляющей погрешности обработки и контур с обратной связью для минимизации случайной составляющей погрешности. Принцип работы данного контура следующий: продольное положение инструмента в каждый момент времени контролируется соответствующим датчиком, и для каждого положения, при помощи вычислительного устройства, на основании известных математических моделей, описывающих деформацию нежесткого вала, определяется требуемое поперечное положение инструмента, которое бы позволило обеспечить сохранение постоянства расстояния между осью детали и режущей кромкой в процессе обработки. В то же время, пятиканальный линейно-квадратичный гауссовский регулятор по результатам измерения диаметров деталей, обработанных на данном станке, в пяти характерных сечениях определяет управляющее воздействие в виде корректировок поперечного положения режущей кромки в каждом из этих сечений. Интерполирующее устройство преобразует эти дискретные значения в непрерывную траекторию движения режущего инструмента. Оба сигнала поступают на сумматор, затем полученный сигнал поступает на устройство сравнения, где сравнивается с фактическим поперечным положением резца, измеренным соответствующим датчиком. Таким образом формируется управляющее воздействие и подается на привод поперечной подачи, в результате чего отрабатывается корректировка траектории движения режущего инструмента, обеспечивающая минимизацию влияния систематической и части случайной составляющих погрешности при обработке нежесткого вала.

Действие второго контура управления направлено на минимизацию влияния случайных (неконтролируемых) возмущающих воздействий на точность обработки и силовую стабилизацию процесса резания путем регулирования величины подачи. В качестве источника информации о протекании процесса резания в данной системе используется тангенциальная составляющая силы резания, которая измеряется тензодатчиком, сигнал от которого поступает в устройство сравнения, где сравнивается

с допустимым значением. Полученный сигнал рассогласования подается на регулятор, формирующий управляющий сигнал. Сигнал управления с учетом знака после усиления подается на привод продольной подачи, в результате чего тангенциальная составляющая силы резания изменяется до допустимого значения.

Реализация данной системы автоматического управления, при наличии программного обеспечения для осуществления алгоритма управления, возможна на базе станков с ЧПУ. Однако, данная система также имеет ряд недостатков. Во-первых, помимо станка, для реализации данной системы требуется наличие внешнего измерительного устройства, осуществляющего контроль обработанных заготовок. Данное устройство должно иметь возможность передавать данные измерений на станок, что технически осуществимо, но требует дополнительных затрат на модернизацию оборудования. Кроме того, для получения начальных статистических данных требуется предварительная обработки партии деталей минимум из четырех штук, что делает неприменимым данный метод в условиях единичного и мелкосерийного производства. Во-вторых, для силовой стабилизации процесса резания используется тангенциальная составляющая силы резания, однако в работах В.Г. Подпоркина [91], А.А. Маталина [60], А.Л. Плотникова [38], теоретически и экспериментально доказано, что подавляющее влияние на точность при токарной обработке нежесткого вала оказывает радиальная составляющая силы резания, что нашло подтверждение и в работах других ученых.

Таким образом, исходя из анализа существующих систем автоматического управления, сделан вывод что задача создания системы управления, применимой в современных условиях обработки на станках оборудованных системами ЧПУ, обеспечивающей достижение требуемой точности формы и размеров при токарной обработке нежестких валов, остается актуальной. Также, стоит отметить, что при разработке систем автоматического управления подавляющее большинство авторов имело своей целью только повышение точности обработки, вопрос о длительном её сохранении не рассматривался, хотя по причине последующего коробления, согласно данным, приведенным в работе [41], отбраковывается до 78% деталей, обработанных изначально с требуемой точностью.

Для определения наиболее эффективного способа управления точностью токарной обработки нежестких валов был произведен структурный анализ процесса токарной обработки как объекта управления, представленный далее.

1.2.4.2. Структурный анализ процесса токарной обработки как объекта управления

Проведенный на основе литературных данных, приведенных в работах [9, 67, 95, 108], и анализа существующих систем автоматического управления, структурный анализ процесса токарной обработки, как объекта управления показателями точности и качества обработанных изделий, позволил выделить следующие группы факторов, влияющих на результат обработки [122]:

1) контролируемые входные факторы (F), которые могут быть определены или измерены перед началом процесса обработки;

2) неконтролируемые входные факторы (возмущающие воздействия) (f_1), которые влияют на технологический процесс, но не могут быть измерены, так как носят случайный характер;

3) закономерности формообразования (f_2) - кинематика формообразования на станке, определяющая закономерности относительного движения детали и инструмента без учета физических явлений, протекающих в зоне резания.

К параметрам регулирования, которые могут использоваться в системах автоматического управления в качестве источника информации о стабильности протекания технологического процесса относятся:

1) параметры состояния процесса резания (x);

2) показатели точности и качества обработки (y).

При этом, для управления показателями точности и качества обрабатываемых деталей могут быть использованы две группы факторов:

1) управляющие воздействия (u_1), которые могут изменяться с целью стабилизации или оптимизации процесса резания;

2) управляющие воздействия (u_2), которые изменяются с целью обеспечения на заданном уровне размера динамической настройки.

На основании вышеизложенного структурная схема процесса резания как объекта управления была разбита на две части (см. рисунок 1.4).

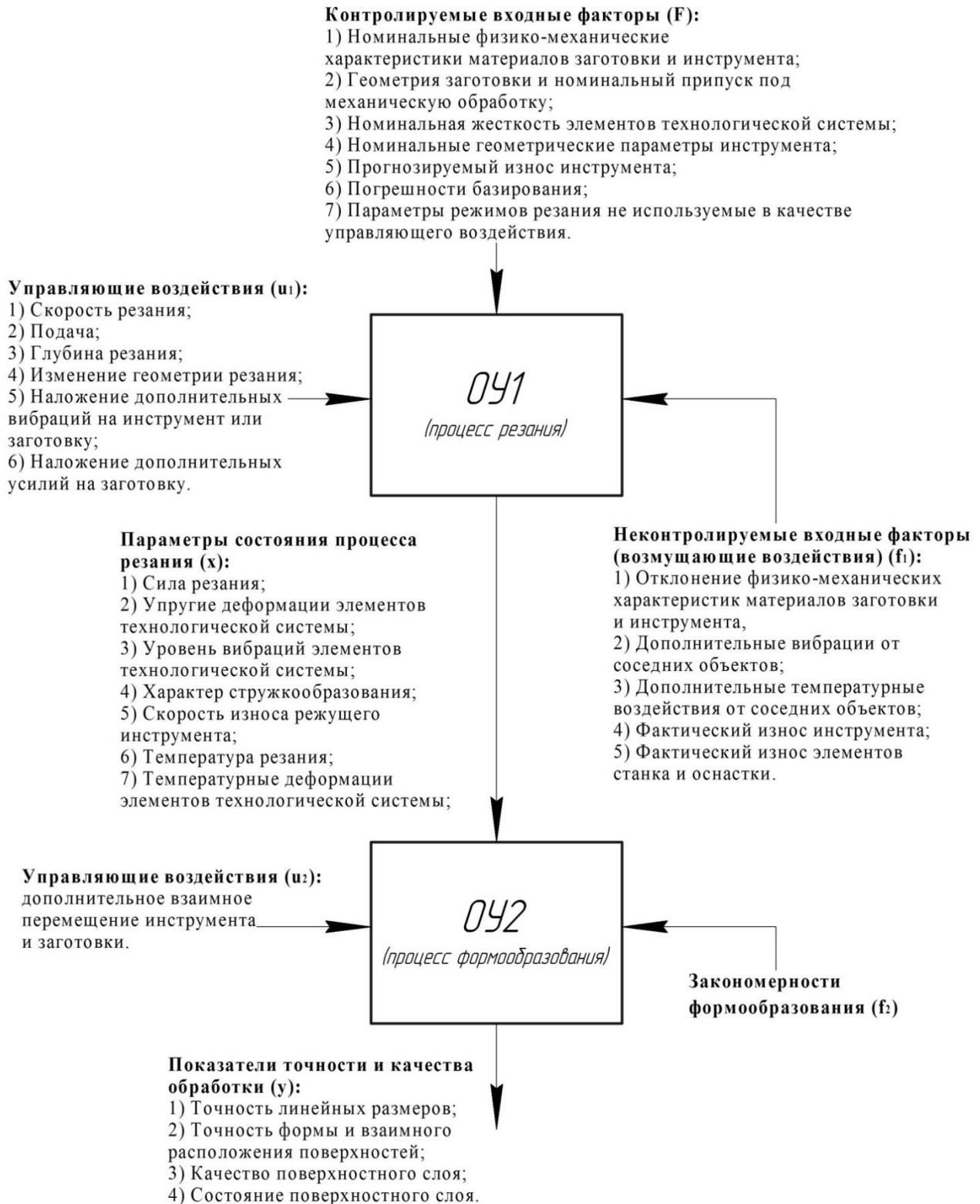


Рис. 1.4. Структурная схема процесса токарной обработке как объекта управления

Первая часть объекта управления OY_1 описывает закономерности изменения процесса резания в зависимости от входных параметров и управляющих воздействий, вторая часть OY_2 - описывает взаимосвязь процесса формообразования с показателями точности и качества процесса обработки. Стоит обратить внимание на то, что параметры состояния, с одной стороны, являются выходными для первой части объекта управления, а с другой стороны - входными для формирования показателей точности и качества обработанных изделий. Таким образом стабилизируя параметры состояния процесса резания можно в значительной мере стабилизировать процесс формообразования. Исходя из этого, можно утверждать об эффективности применения двухконтурной системы управления первый контур будет направлен на стабилизацию параметров состояния процесса резания за счет изменения величины управляющих воздействий, а второй контур будет использовать в качестве параметров регулирования показатели точности и качества обработки, обеспечивая их на заданном уровне путем внесения управляющего воздействия в виде управления траекторий движения режущего инструмента относительно оси центров станка.

Выводы по главе 1. Постановка цели и задач исследования

Анализ номенклатуры изготавливаемых в отечественном машиностроении изделий показал, что большинству случаев к отдельным поверхностям деталей типа нежесткий вал предъявляются высокие требования по геометрической точности (5-6 квалитета), точности формы (радиальное биение рабочих поверхностей вала 0,004-0,05 мм) и шероховатости (Ra 0.16 ÷ 2.5 мкм). Основными методами обработки нежестких валов, обеспечивающими такие высокие требования, являются точение и последующее наружное осциллирующее шлифование. При этом, наибольшей трудоемкостью обладают токарные операции, а результаты их проведения, за счет эффекта технологической наследственности, напрямую влияют на конечную точность изготовления деталей. Однако, значительные упругие деформации деталей данного класса даже при обработке на станках с ЧПУ зачастую не позволяют получить заданную точность размеров и формы обработанных поверх-

ностей, поэтому на практике прибегают к различным технологическим приемам, существенно увеличивающим трудоемкость изготовления изделий и не гарантирующим в достаточной мере достижения стабильности результатов обработки. Данное обстоятельство позволило сформулировать **проблему исследования**, которая состоит в несогласованности высоких требований к точности и качеству изделий машиностроения, применительно к изделиям малой жесткости, с одной стороны, и недостаточной эффективностью существующих методов обеспечения этих требований, с другой.

Одним из наиболее эффективных методов решения данной проблемы является адаптивное управление процессом резания. Однако, несмотря на большое количество научных исследований и разработанных систем автоматического управления, эффективность их применения при токарной обработке нежестких валов ограничена в силу следующих обстоятельств:

- использование в алгоритмах управления формул расчета прогиба вала, заимствованных из дисциплины “сопротивление материалов”, не учитывающих особенностей протекания процесса резания, в частности взаимовлияния неравномерности податливости системы в процессе обработки на величину составляющих силы резания, а также перераспределения податливости длинномерных валов по ходу обработки в следствии постоянного изменения соотношения обработанной и обрабатываемых частей заготовок;

- недостаточно высокой точности традиционных методик расчета радиальной составляющей силы резания, положенных в основу алгоритма управления, в силу некорректного учета в них влияния теплофизических характеристик материалов инструмента и заготовки;

- необходимости регулирования параметра регулирования в широком диапазоне (в частности величины подачи), обусловленной значительными деформациями обрабатываемой заготовки под действием сил резания, приводящей к существенному снижению производительности и качеству обработки.

Кроме того, в большинстве своем системы автоматического управления являются самостоятельными объектами с аппаратным управлением и не могут быть ус-

тановлены на станках ЧПУ, однако, наиболее эффективно применение систем адаптивного управления именно на станках с ЧПУ, так как многие узлы станков могут быть использованы в качестве исполнительных механизмов системы управления.

Исходя из проблемы исследования и выявленных недостатков существующих методов её решения была сформулирована цель диссертационного исследования.

Цель работы: Обеспечение требуемой точности формы и размеров обработанных деталей типа нежесткий вал и сохранение достигнутой точности во времени путем автоматического управления процессом резания при токарной обработке на станках с ЧПУ.

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

1. Задачи по специальности 05.02.08

1. На основании структурного анализа процесса токарной обработки как объекта управления и анализа существующих систем автоматического управления, выявить параметры регулирования, стабилизация которых в процессе токарной обработки нежестких валов, за счет изменения величины параметра управления, позволит обеспечить требуемую точность формы и размеров обработанных деталей, а также сохранить достигнутую точность во времени (в процессе хранения и эксплуатации).

2. Произвести анализ влияния упругих деформаций элементов технологической системы на точность формы и размеров обработанных деталей и разработать уточненную математическую модель для расчета ожидаемой погрешности обработки, учитывающую физические особенности протекания процесса токарной обработки нежестких заготовок.

3. На основании структурного анализа процесса токарной обработки как объекта управления и исходя из физических особенностей обработки нежестких заготовок разработать способ управления, позволяющий производить обработку на рациональных режимах резания и обеспечивающий достижение требуемой точности формы и размеров обработанных деталей, а также сохранение достигнутой точности во времени.

2. Задачи по специальности 05.02.07

4. Разработать уточненные математические модели параметров состояния процесса резания и показателей качества обработки, учитывающие теплофизические свойства контактной пары «инструмент-заготовка».

5. Разработать структурную и функциональную схемы и алгоритм функционирования системы автоматического управления процессом токарной обработки, применимой на станках с ЧПУ без необходимости изменения их конструкции, обеспечивающей достижение требуемой точности формы и размеров обработанных деталей и сохранение достигнутой точности во времени.

6. Провести экспериментальные исследования эффективности применения разработанной системы управления и разработать рекомендации по её применению.

На основании структурного анализа токарной обработки как объекта управления, установлено, что обработка может быть рассмотрена как два последовательно протекающих процесса: собственно процесс резания, рассматриваемый с точки зрения закономерностей изменения силовых характеристик в зависимости от режимных и технологических факторов, и процесс формирования показателей точности и качества обработки как совокупность закономерностей формообразования и силовых характеристик процесса резания.

Исходя из этого, была выдвинута гипотеза об эффективности применения двухконтурной системы управления первый контур будет направлен на стабилизацию параметров состояния процесса резания за счет изменения величины управляющих воздействий, а второй контур будет использовать в качестве параметров регулирования показатели точности и качества обработки, обеспечивая их на заданном уровне путем внесения управляющего воздействия в виде управления траекторий движения режущего инструмента относительно оси центров станка.

Глава 2. Методика проведения экспериментальных исследований

Данная глава посвящена методике проведения экспериментальных исследований: представлено оборудование на котором осуществлялись исследования, приборы контроля и измерительные приборы, применяемые для регистрации результатов исследования и их основные технические характеристики, методика сбора и обработки экспериментальных данных, применение которых позволяет говорить о достоверности результатов экспериментальных исследований.

2.1. Металлорежущее оборудование, задействованное при проведении исследований

Исследование процесса формирования радиальной составляющей силы резания проводилось на токарно-винторезном станке модели 1М63, установленном на кафедре «Технология машиностроения» ВолгГТУ (см. рисунок 2.1).



Рис. 2.1. Общий вид станка модели 1М63 : 1 - станок; 2 - векторный преобразователь частот; 3 - интерфейсный кабель; 4 - персональный компьютер

Электродвигатель привода главного движения данного станка оснащен векторным преобразователем частоты со встроенным PLC-контроллером модели Wesper E2-8300, позволяющим бесступенчато регулировать скорости вращения шпинделя. Преобразователь частот соединен посредством интерфейсного кабеля с персональным компьютером, что позволяет осуществлять регулирование скорости вращения не только с панели управления, находящейся на корпусе регулятора, но и с персонального компьютера, за счет чего повышается удобство проведения экспериментов. Методика исследования силовой напряженности процесса резания подробно описана в разделе 2.3.

Проведение экспериментальных исследований эффективности разработанной системы и экспериментальная проверка полученной уточненной формулы точности токарной обработки нежесткого вала в центрах осуществлялась в производственных условиях на токарно-винторезном станке модели CA500C15Ф3 с системой ЧПУ модели Sinumerik 828D, находящемся на производственной площадке АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады» (см. рисунок 2.2).



Рис. 2.2. Общий вид станка модели CA500C15Ф3

Данный станок оснащен датчиком крутящего момента на двигателе главного движения, отражающим уровень нагрузки, по изменению величины которой можно опосредованно судить об изменении силовой характеристики процесса резания. Данные о уровне нагрузки на двигатель выводятся на экран панели управления в процентном выражении.

Перед проведением исследований методом статического нагружения, согласно методике описанной в работе [100], была определена жесткость узлов станка модели СА500С15Ф3 и её соответствие требованиям ГОСТ 18097–88 «Станки токарно-винторезные и токарные. Нормы точности и жесткости». Схема установки для измерения жесткости представлена на рисунке 2.3.

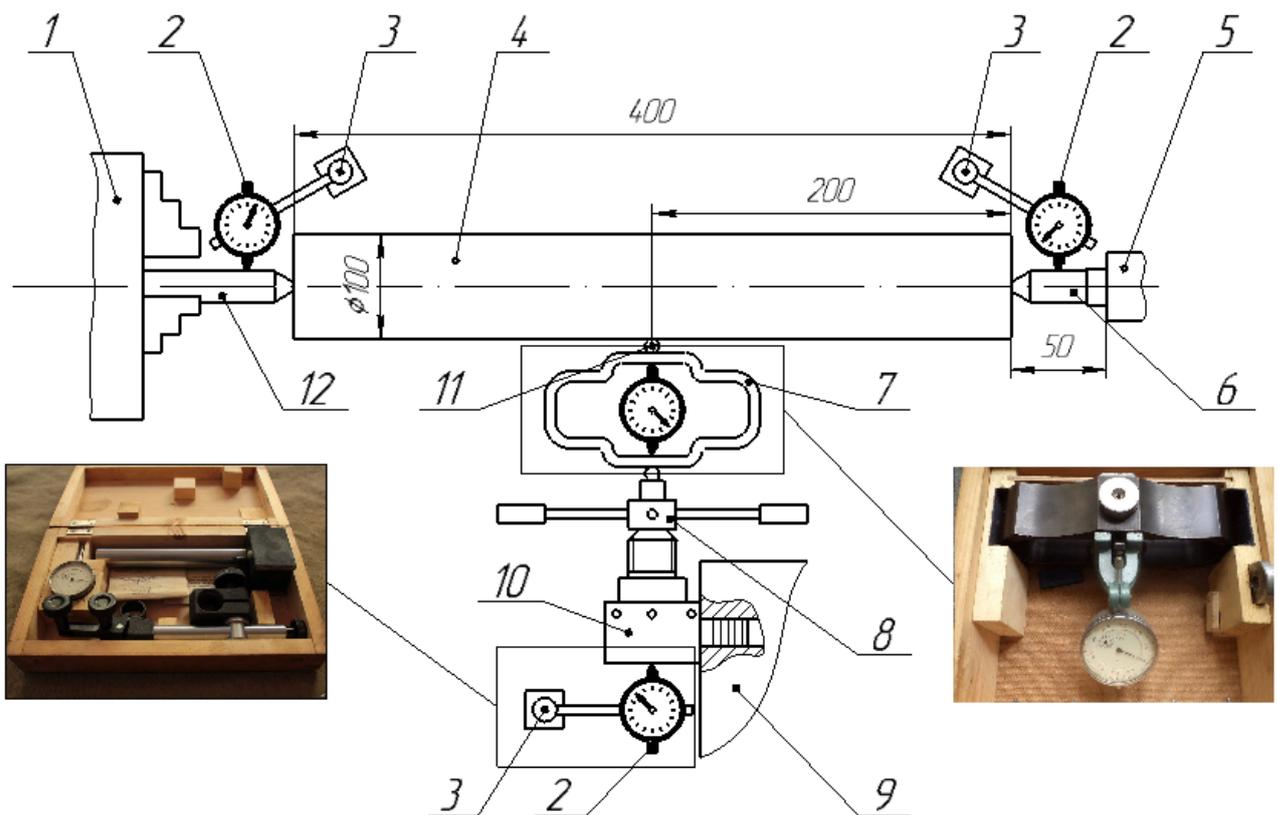


Рис. 2.3. Схема установки для измерения жёсткости токарного станка методом статического нагружения: 1–передняя бабка с патроном; 2– Индикатор 1 МИГ-1 ГОСТ 9696-82; 3–магнитная стойка для индикатора; 4–центровая оправка; 5–корпус задней бабки; 6, 12–задний и передний центр; 7–динамометр ДОУМ-3-100 И ГОСТ 9500-84; 8–поджимной винт; 9 - револьверная головка; 10– инструментальный блок; 11 -шарики стальные закаленные.

Таблица 2.1 – Податливость и жесткость узлов станка мод. СА500С15Ф3

№ п/п	Наименование узла	Податливость, м/Н	Жесткость, Н/м
1	Передняя бабка	$0,14 \times 10^{-7}$	$7,2 \times 10^7$
2	Задняя бабка	$0,28 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^7$
3	Суппорт	$0,16 \times 10^{-7}$	$6,1 \times 10^7$

Согласно паспорту, станок модели СА500С15Ф3 относится к нормальному классу точности, и измеренная фактическая жесткость его узлов, (см. таблицу 2.1), соответствует требованиям, предъявляемым к данному классу точности станка по ГОСТ 18097–88. Подробно методика проведения экспериментальных исследований эффективности разработанной системы описана в разделе 2.4 и 2.5, а также в главе 5.

2.2. Обрабатываемые материалы, режущий инструмент

Детали типа вал в большинстве своем исходя из функционального назначения относятся к ответственным деталям, работающим в условиях действия больших знакопеременных нагрузок, поэтому к материалам из которых они изготавливаются предъявляется ряд требований: высокий модуль упругости, прочность и вязкость (усталостная прочность), хорошая обрабатываемость, прокаливомость и т.д. Наиболее полно данным требованиям отвечают углеродистые и легированные стали. Так, при изготовлении средненагруженных валов применяют качественные конструкционные углеродистые стали, например стали 20 и 25, с последующей цементацией или азотированием отдельных рабочих поверхностей. Для изготовления более ответственных деталей, например быстроходных валов, червячных валов, полуосей автомобилей, коленчатых валов, используют улучшаемые стали 30Х, 40Х и др. с последующей объемной закалкой или поверхностной закалкой ТВЧ. Из стали 20ХН изготавливают шлицевые валы, пальцы поршней. Тяжелонагруженные валы изготавливают из легированных сталей 40ХН, 40ХНМА, 12ХНЗА, 18ХГТ, 30ХГС и др. с последующей термообработкой, улучшающей механические свойства материала. Цементируемые стали (например, 20А, 12ХНЗА)

и азотируемые (например, 38ХЮ, 38ХМЮА) применяются, отдельные элементы вала (цапфы, шлицы, зубья и т.д.) должны иметь высокую твердость и износостойкость. Гребные валы для морских судов изготавливают из высокопрочных сталей марок 38ХМА и 36Х2Н2МФА, обладающих высокой хладостойкостью. Для работы в условиях агрессивной среды, валы изготавливают из нержавеющей сталей, например 1Х13, 3Х13, 4Х14, Х18. Реже валы и оси изготавливают из стального литья (стали 35Л, 40Л, 45Л, 50Л) с термообработкой (отжиг или нормализация). В отдельных случаях применяется качественный серый чугун, высокопрочный и модифицированный чугун (при изготовлении коленчатых валов) или сплавы цветных металлов (например, в приборостроении) [37, 63, 93]. Исходя из вышесказанного, в качестве обрабатываемых материалов при проведении исследований использовались конструкционные углеродистые и легированные стали (см. таблицу 2.2). Для обеспечения стабильности физико-механических свойств в качестве заготовок для всех марок обрабатываемых материалов при проведении исследований использовался сортовой прокат одной плавки в состоянии поставки. Физические и механические свойства, а также химический состав материалов приведены в таблицах 2.3-2.5.

Таблица 2.2 – Обрабатываемые материалы

Обрабатываемый материал	Заменители [106]	Импортные аналоги [120]				Назначение [106]
		США (ASTM)	Германия (DIN)	Япония (JIS)	Европа (EU)	
1	2	3	4	5	6	7
Конструкционная углеродистая качественная сталь 20	15 25	1020	С 22	S20C	С 20	Детали, от которых требуется высокая твердость поверхности (после цементации) и невысокая прочность сердцевины
Конструкционная легированная хромоникелевая сталь 20ХН	15ХР 20ХНР 18ХГТ	3120	-	-	-	Детали, от которых требуется повышенная вязкость и умеренная прокаливаемость.

Таблица 2.4 – Механические свойства обрабатываемых материалов

Сталь	σ_T , Н/мм ²	σ_B , Н/мм ²	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ	Состояние постав- ки
20	245	410	25	55	49	163	Закалка 800°C; отпуск при 180°C
20ХН	590	780	14	50	78	197	Закалка 860°C; отпуск при 180 °C
40Х	785	980	10	45	59	217	Закалка 860°C; отпуск при 500 °C
30ХМА	735	930	12	50	88	229	Закалка 880°C; отпуск при 540°C

Условные обозначения в таблицах 2.3-2.4: E – модуль нормальной упругости; α – коэффициент линейного температурного расширения; λ – коэффициент теплопроводности; ρ – плотность; C – удельная теплоемкость; t – температура; σ_T – предел текучести; σ_B – предел временного сопротивления; δ – относительное удлинение после разрыва; ψ – относительное сужение после разрыва; КСУ – ударная вязкость; НВ – твердость по Бринеллю.

Таблица 2.5 – Химический состав обрабатываемых материалов

Сталь	Химический состав, %									
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	As	P	S	Cu
ГОСТ 1050-2013										
20	0,17÷ 0,24	0,17÷ 0,37	0,35÷ 0,65	не более 0,25	не более 0,30	-	не более 0,08	не более 0,030	не более 0,035	не более 0,30
ГОСТ 4543-2016										
20ХН	0,17÷ 0,23	0,17÷ 0,37	0,40÷ 0,70	0,45÷ 0,75	1,00÷ 1,40	-	-	не более 0,035	не более 0,035	не более 0,30
40Х	0,36÷ 0,44	0,17÷ 0,37	0,50÷ 0,80	0,45÷ 0,75	не более 0,30	-	-	не более 0,035	не более 0,035	не более 0,30
30ХМА	0,26÷ 0,33	0,17÷ 0,37	0,40÷ 0,70	0,80÷ 1,10	не более 0,30	0,15÷ 0,25	-	не более 0,035	не более 0,035	не более 0,30

В соответствии с выбранными для исследования материалами материалов, их физико-механическими и теплофизическими свойствами, технологическими возможностями металлорежущего оборудования, конструктивными особенностями заготовок и условиями обработки (получистовая и чистовая обработка), исходя из анализа рекомендаций по назначению геометрии и марки материала режущего инструмента, приведенными в литературе [49, 61, 72, 103, 147, 148], для проведе-

ния исследований силовых характеристик процесса резания и процесса образования шероховатости поверхности, как наиболее универсальных для данных условий обработки, были выбраны твердосплавные сменные многогранные пластины (СМП) тригональной формы WNUM 080408 без покрытия из твердых сплавов вольфрамо-кобальтовой (ВК6), титано-вольфрамо-кобальтовой (Т15К6), безвольфрамовой (ТН20) групп, устанавливаемые на динамометр ДКМ 2010, конструкция которого описана далее. Фазово-химический состав, механические и теплофизические свойства твердых сплавов приведены в таблице 2.6. Для обеспечения надежности и достоверности получаемых результатов, режущие пластины были отобраны по критерию величины термо-ЭДС естественной термопары [20, 25, 89]. Колебания величины термо-ЭДС для каждой группы режущих пластин не превышало 5%.

Таблица 2.6 – Фазово-химический состав, механические и теплофизические свойства твердых сплавов

Марка твердого материала	Фазово-химический состав, %						$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	$\sigma_{\text{сж}}$, МПа	HRA	λ , Вт/(м·К)
	WC	TiC	TaC	Co	Ni	Mo				
ВК6	94	-	-	6	-	-	1320÷1660	4300÷4900	88	50
Т15К6	79	15	-	6	-	-	1127-1180	4120-4210	90	27
ТН20	-	79	-	--	16	5	1080	3430	90	11

Условные обозначения в таблице 2.6: $\sigma_{\text{изг}}$ – предел временного сопротивления на изгиб; $\sigma_{\text{сж}}$ – предел временного сопротивления на сжатие; HRA – твердость по Роквеллу (шкала А); λ – коэффициент теплопроводности.

В связи с тем, что в практике машиностроения все более широкое применение находят режущие пластины с износостойкими покрытиями, на основании результатов исследований пластин с покрытиями [29, 46, 114, 147, 148], рекомендаций [143] и производственного опыта АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», при исследовании эффективности применения программного контура управления использовались пластины WNUM080408-MP («Korloy») с покрытием NC3120, нане-

сенным способом химического осаждения (CVD), установленные на державку PVLNL 2525-M08 (главный угол в плане $\varphi = 95^\circ$, вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 5^\circ$, передний угол $\gamma = -6^\circ$, угол наклона главной режущей кромки $\lambda = -6^\circ$, радиус сопряжения главной и вспомогательной режущих кромок $r = 0,8$ мм). Верхний слой трехуровневого покрытия состоит из нитрида титана TiN, повышающего устойчивость к наростообразованию, промежуточный – оксида алюминия Al_2O_3 , повышающего термостойкость, подложка - карбонитрида титана TiCN, повышающего сопротивление выкрашиванию. Данные пластины подходят как для прерывистой, так и для непрерывной чистовой и получистовой обработки широкого круга материалов группы ISO P (конструкционные и легированные стали).

2.3. Методика исследования силовых характеристик процесса резания

Для определения силовых характеристик процесса резания в зависимости от режимных параметров и физико-механических свойств с целью дальнейшего построения на основе полученных данных уточненных математических моделей формирования радиальной составляющей силы резания для случаев чистовой токарной обработки сталей 20, 20ХН, 30ХМА был проведен ряд экспериментов в соответствии с мультипликативной моделью полнофакторного эксперимента 3^4 . В качестве факторов, определяющих значение функции отклика, были выбраны: скорость резания V (90; 135; 180 м/мин), подача S (0,083; 0,166; 0,256 мм/об), глубина резания t (0,5; 0,7; 1,0 мм) и теплопроводность инструментального материала λ (11, 27, 50 Вт/мК). Методика регрессионного анализа и статистической обработки результатов экспериментов представлены в разделе 2.5. Обработка производилась на токарно-винторезном станке модели 1М63, технические характеристики которого описаны ранее, без применения СОЖ. Измерение и регистрация величин составляющих силы резания производилось при помощи тензометрического динамометра модели DKM 2010 производства «TeLC» (Германия), основные технические характеристики которого представлены в таблице 2.7. С целью исключения негативного влияния остаточного гистерезиса на точность измерений, динамометр после каждой серии экспериментов проходил тарировку.

Таблица 2.7 –Технические характеристики динамометра DKM 2010 [154].

Характеристика	Значение характеристики
Диапазон измерений сил резания по осям X/Y/Z, Н	0-2000
Разрешающая способность измерений, Н	1
Погрешность измерения, %	0,1
Частота преобразования, отсчет в секунду (SPS)	100
Диапазон регулирования частоты сбора данных, Гц	5-100
Габариты прибора, мм: длина×ширина×высота	206×60×70

Данная модель динамометра (см. рисунок 2.4) представляет собой специальную державку со встроенными тензометрическими датчиками, которая за счет наличия буртиков может быть установлена на работу с продольной или поперечной подачей как в стандартный резцедержатель универсального станка, так и при помощи инструментального блока - в револьверную голову станка с ЧПУ. С помощью зажимных планок, фиксируемых слева и справа, возможна регулировка главного угла в плане, что расширяет технологические возможности прибора. При проведении исследований главный угол в плане составлял 95° .

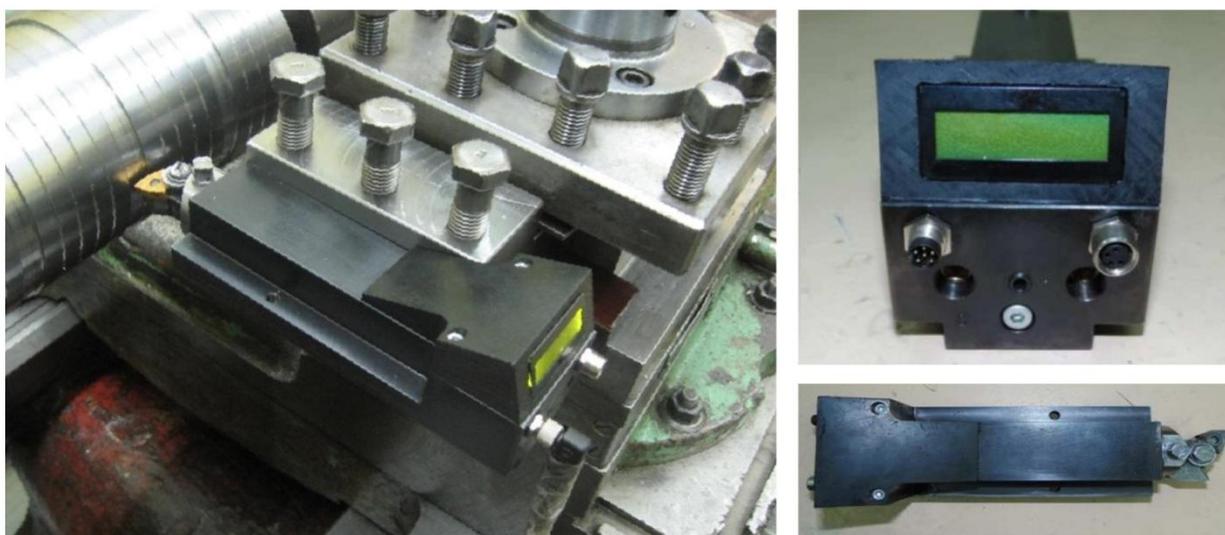


Рис. 2.4. Конструкция динамометра модели DKM 2010

Динамометр является пятиканальным и позволило выполнять одновременное измерение радиальной, осевой и тангенциальной составляющих сил резания, темпе-

ратуры резания и уровня износа СМП (посредством отслеживания изменения отношения тангенциальной и радиальной составляющих силы резания в процессе обработки) для получения более полного представления о характере протекания процесса резания. Измеренные значения считывались непосредственно с дисплея динамометра с помощью функции автоматического усреднения и удержания и, за счет наличия подключения к персональному компьютеру, в специальном программном модуле «ХКМ-2000 Trialversion», фрагмент интерфейсного меню которого представлен на рисунке 2.5. Данное программное обеспечение позволяет осуществлять запись, хранение, обработку и вывод полученных данных.

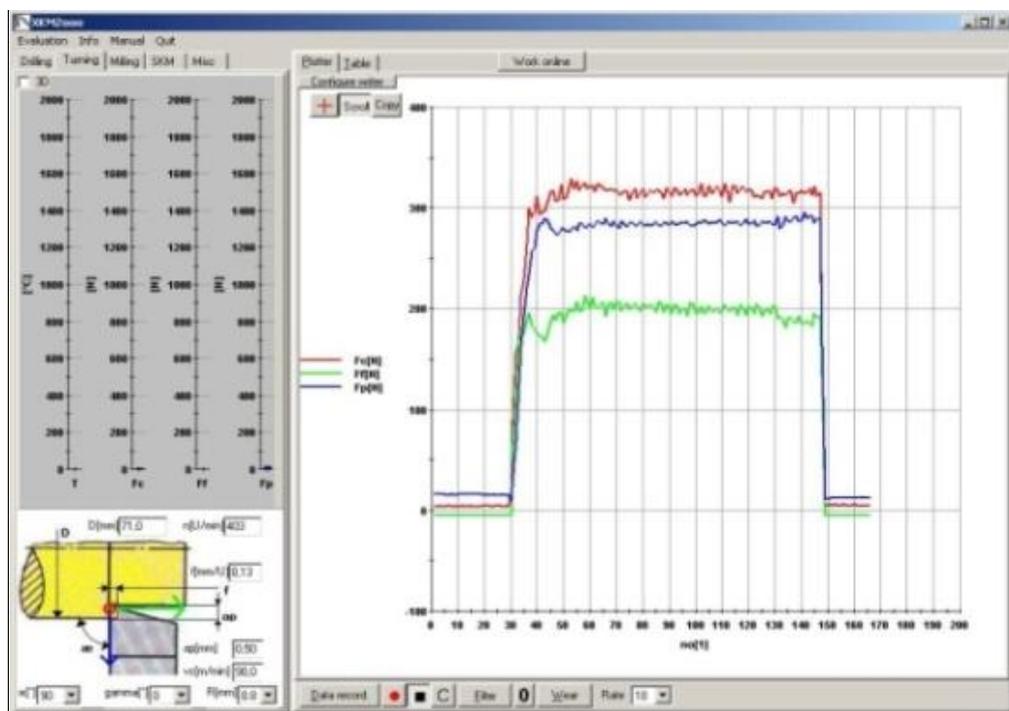


Рис. 2.5. Фрагмент интерфейсного меню программном обеспечении «ХКМ-2000 Trialversion»

2.4. Методика исследования геометрической точности обработанных деталей

Для оценки достоверности предложенной уточненной методики расчета погрешности токарной обработки нежесткого вала была произведена обработка партий длинномерных гладких валов. Условия проведения обработки указаны в разделе 3.4. Так как предложенная уточненная методика расчета погрешности токарной обработки предполагает получение профиля обработанного вала отличного от ожидаемого по "традиционным" методикам расчета (со смещением сечения с максимальным диаметром от цен-

тра детали в право или влево в зависимости от соотношения моментов инерции поперечного сечения детали и заготовки) для оценки её достоверности диаметры обработанных деталей измерялись в четырнадцати сечениях с равным шагом и отступом от торца 10 мм для возможности проведения измерения. Измерения проводились при помощи микрометра МК Ц50 ГОСТ 6507-90 в трех плоскостях в каждом из сечений.

Оценка эффективности применения программного контура системы адаптивного управления осуществлялась путем сравнения геометрической точности двух партий обработанных гладких валов состоящих из двух групп: обработанных без применения САУ и с её применением. Условия проведения обработки указаны в разделе 5.1. После обработки измерялись следующие параметры точности: точность диаметрального размера и отклонение от круглости в четырнадцати сечениях, отклонение от цилиндричности. Измерения диаметральных размеров проводились при помощи микрометра МК Ц50 ГОСТ 6507-90 в трех плоскостях в каждом из сечений. Измерения отклонения от круглости проводились сразу после обработки на станке при помощи индикатора ИЧ-01-0,001 ГОСТ 9696-82 по схеме приведенной на рисунке 2.6.

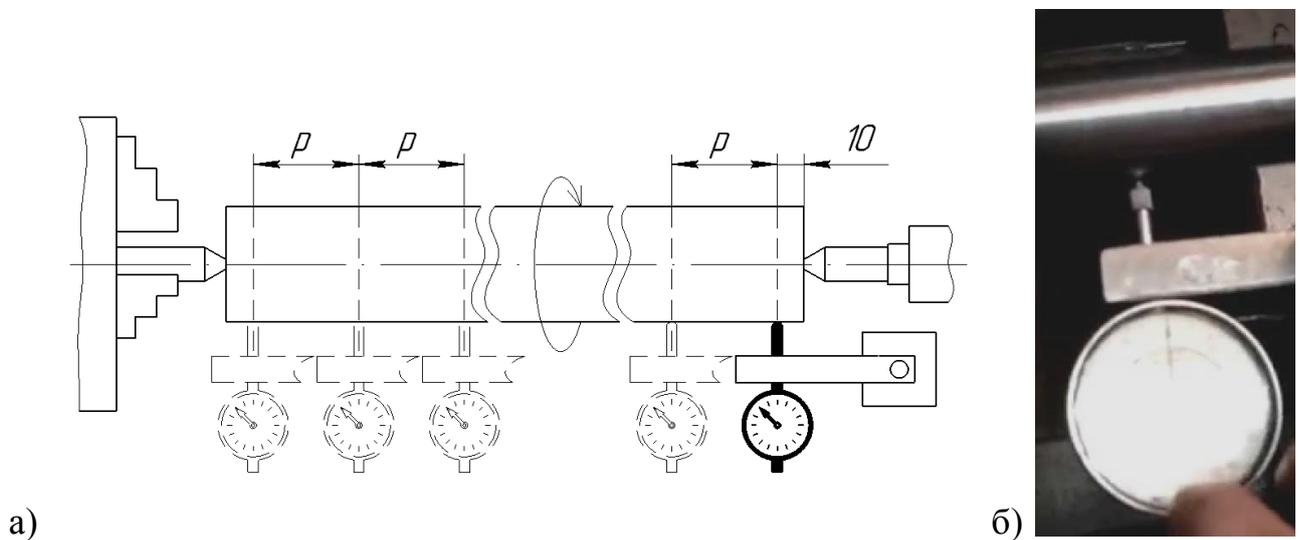


Рис. 2.6. Схема измерения отклонения от круглости: а) общая схема измерения; б) измерение отклонения от круглости на станке СА500С15Ф3

Измерения отклонения от цилиндричности проводилось сразу после снятия детали со станка на координатно-измерительной машине модели КИМ-1400, основные технические характеристики которой приведены в табл. 2.8. Данное средство

измерения зарегистрировано в Госриестре СИ (№22266-01). По результатам измерения координатно-измерительная машина при помощи специального программного обеспечения Samiso в автоматизированном режиме формирует протокол измерений (см. рисунок 2.8). Для измерений использовалась контактный щуп TP200 Renishaw с установленным рубиновым наконечником диаметром 2 мм. Перед проведением исследований была произведена калибровка координатно-измерительной машины. Для сохранения постоянства измерительных баз, детали для измерения устанавливались в центра (см. рисунок 2.7).

Таблица 2.8 – Технические характеристики КИМ-1400 [77]

Характеристика	Значение характеристики
Погрешность измерения формы, мкм:	$2,1 + L/300$
Пределы измерения по осям X;Y;Z, мм	1200x800x500
Измерительное усилие срабатывания щупового датчика, Н	0,2-1
Число согласованных управляемых координат	6
Максимальная скорость измерения, точек/сек.:	5



Рис. 2.7. Измерение точности продольного и поперечного профиля на координатно-измерительной машине КИМ-1400

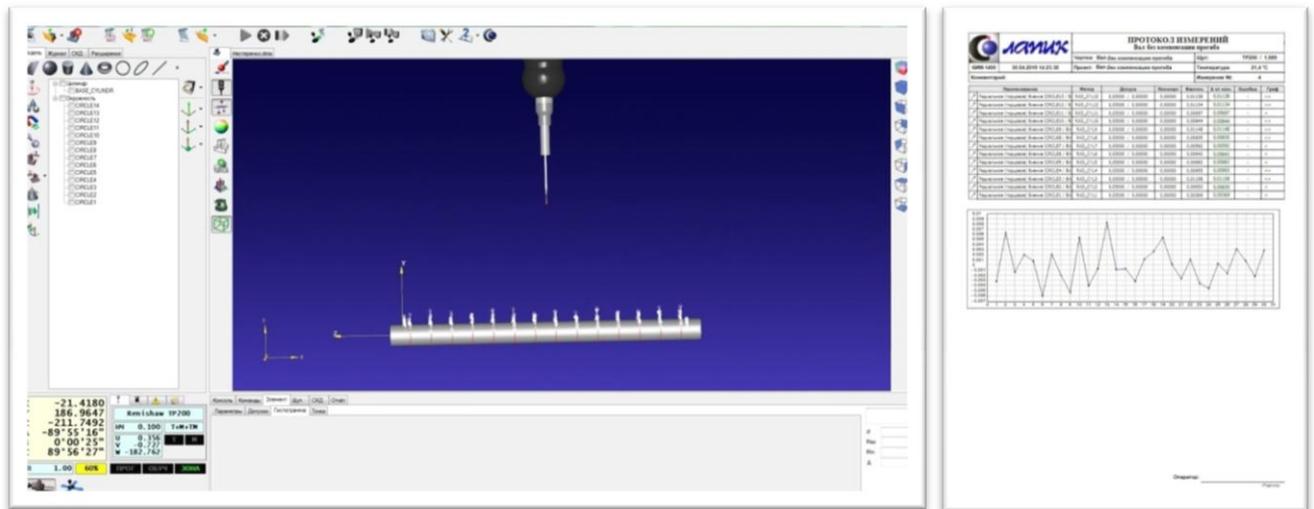


Рис. 2.8. Фрагмент интерфейсного меню программного обеспечения Samiso и протокол измерения

Для оценки величины последующего искривления оси деталей вследствие перераспределения остаточных напряжений, показатели точности продольного (отклонение от цилиндричности) и поперечного (отклонение от круглости) профиля обеих групп обеих партий деталей были повторно измерены через 24, 72, 720 часов на координатно-измерительной машине модели КИМ-1400.

2.5. Методика исследования шероховатости после механической обработки

При проведении исследований силовых характеристик процесса обработки, описанных в параграфе 2.3, с целью разработки ограничений в алгоритм функционирования САУ, позволяющих обеспечивать постоянство шероховатости обработанных поверхностей как в пределах одной детали так и в партии деталей, исследовалась также и взаимосвязь шероховатости поверхности с режимными параметрами и условиями обработки. При исследованиях проводились измерения среднее арифметическое отклонение профиля R_a при помощи профилографа-профилометра Абрис-ПМ7, интегрированного через порт последовательного интерфейса RS232C с персональным компьютером (см. рисунок 2.9). Данное средство измерения зарегистрировано в Госриестре СИ (№19876-00). Перед проведением

измерений была проведена калибровка прибора по эталонному образцу, что позволило гарантировать проведение измерений с точностью в пределах 0,01-0,001 мкм (см. таблицу 2.9).



Рис. 2.9. Профилограф-профилометр Абрис-ПМ7: а) общий вид; б) протокол измерения

При оценке эффективности применения программного контура системы адаптивного управления шероховатость поверхности R_a определялась помощи портативного профилометра TR200 (см. рисунок 2.10), зарегистрированного в Госреестре СИ (№58865-14). Основные технические характеристики профилометра TR200 представлены в таблице 2.9. Перед проведением измерений была проведена калибровка прибора при помощи эталонного образца и функции автокалибровки. Значения параметров шероховатости измерялись в нескольких местах и считывались непосредственно с дисплея профилометра.



Рис. 2.10. Общий вид профилометра TR 200

Таблица 2.9 – Основные технические характеристики используемых профилометров

Характеристика	Значение характеристики	
	Абрис-ПМ7	TR200
Горизонтальные увеличения профилографа	20, 50, 100, 200, 500	20, 50, 200
Максимальная длина участка измерения, мм	75	5
Предел допускаемой основной погрешности	$\Delta Ra = 0.02 Ra_{в.п.} + 0.04 Ra$ (мкм)	± 10 (%)
Скорость перемещения щупа при рабочем ходе, мм/с	1 ± 0.05	1 ± 0.05

2.6. Методика обработки результатов экспериментальных исследований

В соответствии с методикой, приведенной в работах [20, 126], в рамках исследования был произведен регрессионный анализ и на его основе построены математические модели формирования радиальной составляющей силы резания R_Y и шероховатости обработанной поверхности Ra в зависимости от режимных параметров и условий обработки. Для исследований, как наиболее часто рассматриваемые, были приняты аддитивная и мультипликативные математические модели следующих спецификаций [20, 48, 126, 131]:

1) линейная, вида:

$$R = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i \cdot \Phi_i; \quad (2.1)$$

2) степенная, вида:

$$R = c_0 \cdot \prod_{i=1}^n \Phi_i^{c_i}; \quad (2.2)$$

3) показательная, вида:

$$R = c_0 \cdot \prod_{i=1}^n c_i^{\Phi_i}; \quad (2.3)$$

где R – функция отклика; c_0 – постоянная составляющая функции отклика, не зависящая от значений рассматриваемых факторов Φ_i ; c_i – параметры, зависящие от степени влияния каждого рассматриваемого фактора; n – число рассматриваемых факторов.

Минимальное и достаточное количество опытов для проведения полнофакторного эксперимента, обладающего свойствами ортогональности и ротатабельности, на основании которого выполнялось моделирование, определялось по следующему выражению:

$$k_{\min} = p^n; \quad (2.4)$$

где k_{\min} – минимально необходимое и достаточное количество независимых комбинаций опытов при полном факторном эксперименте; p – количество уровней варьирования факторов; n – количество рассматриваемых факторов.

Для построения матрицы планирования эксперимента было произведено нормирование исходных данных в натуральных безразмерных (нормированных) величинах, где значение уровня [1] соответствует максимальному значению фактора, [0] – среднему, а [-1] – минимальному. Таким образом, исследования проводились в соответствии с полнофакторными матрицами планирования экспериментов, примеры которых для случая построения математических моделей формирования радиальной составляющей силы резания (см. таблицу Б.1) и шероховатости поверхности (см. таблицу Б.2) при обработке стали 20ХН приведены в приложении Б.

Первоначальная оценка существования и характера зависимости функции отклика от каждого из факторов и наличия взаимосвязи между факторами осуществлялась исходя из коэффициентов парной корреляции, характеризующих вероятность линейной корреляционной связи между ними:

$$r_i = \frac{\overline{\Phi_i \cdot R} - \overline{\Phi_i} \cdot \overline{R}}{\sigma_{\Phi_i} \cdot \sigma_{\Phi_R}}; \quad (2.5)$$

$$r_{ij} = \frac{\overline{\Phi_i \cdot \Phi_j} - \overline{\Phi_i} \cdot \overline{\Phi_j}}{\sigma_{\Phi_i} \cdot \sigma_{\Phi_j}}; \quad (2.6)$$

где σ_{Φ_i} , σ_{Φ_j} – стандартное отклонение значений рассматриваемых факторов; σ_{Φ_R} – стандартное отклонение функции отклика.

В случае, если модуль коэффициента парной корреляции превышает величину 0,5, зависимость вероятна и близка к линейной. При меньшем значении модуля коэффициента парной корреляции отличном от нуля, вероятность зависимости также сохраняется, но её характер имеет нелинейный вид.

Для оценки степени влияния каждого из факторов были построены многофакторные регрессионные модели. Построение регрессионных зависимостей осуществлялось при помощи программа Microsoft Office Excel 2007 (см. рисунок 2.11).

Рис. 2.11. Пример построения регрессионных зависимостей в программе Excel 2007

Так как рассматриваемые факторы (скорость резания, глубина резания, подача и теплопроводность инструментального материала) имеют различные единицы измерения и масштаб, то для обеспечения сопоставимости влияния каждого из факторов на величину и характер изменения функции отклика по методу линейного программирования была произведена линеаризация исходных регрессионных моделей различных спецификаций в соответствии с выражениями (2.7) - (2.12):

- для линейной модели:

$$Y = 2 \cdot \frac{R - R_{\min}}{R_{\max} - R_{\min}} - I; \quad (2.7)$$

$$X_i = 2 \cdot \frac{\Phi_i - \Phi_i^{\min}}{\Phi_i^{\max} - \Phi_i^{\min}} - I; \quad (2.8)$$

- для степенной модели:

$$Y = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{R}{R_{\min}}\right)}{\ln\left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}}\right)} - I; \quad (2.9)$$

$$X_i = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{\Phi_i}{\Phi_i^{\min}}\right)}{\ln\left(\frac{\Phi_i^{\max}}{\Phi_i^{\min}}\right)} - I; \quad (2.10)$$

- для показательной модели:

$$Y = 2 \cdot \frac{\ln\left(\frac{R}{R_{\min}}\right)}{\ln\left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}}\right)} - I; \quad (2.11) \quad X_i = 2 \cdot \frac{\Phi_i - \Phi_i^{\min}}{\Phi_i^{\max} - \Phi_i^{\min}} - I; \quad (2.12)$$

В результате нормирования по формулам (2.7) - (2.12) исходные модели примут общий промежуточный вид:

$$Y = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \cdot X_i; \quad (2.13)$$

где Y - нормированное значение функции отклика; a_0 – постоянная составляющая нормированной функции отклика, не зависящая от нормированных значений рассматриваемых факторов X_i ; a_i – параметры, зависящие от степени влияния каждого рассматриваемого фактора после нормирования.

После выполнения нормирования, построение регрессионных моделей вне зависимости от их спецификации осуществлялось в несколько этапов [20, 126]:

1) Расчет коэффициентов регрессии a_i для «значимых» факторов:

$$a_i = \frac{\sum_{j=1}^k X_{ij} \cdot Y_j}{\sum_{j=1}^k X_{ij}^2}; \quad (2.14)$$

где i – номер переменной; j – номер строки; k – количество строк расчетной таблицы.

2) Расчет «нулевого» коэффициента регрессии a_0 , определяющего влияние случайных факторов:

$$a_0 = \frac{\sum_{j=1}^k Y_j}{k}; \quad (2.15)$$

3) Расчет прогнозируемых нормированных значений функции отклика Y' по формуле (2.13) для каждой строки расчетной таблицы.

4) Определение расчетного значения критерия Стьюдента, определяющего существенность отличия коэффициентов регрессии от нулевых значений:

$$t_i = \frac{|a_i|}{\sigma_Y}; \quad (2.16)$$

где σ_Y —стандартное отклонение нормированной функции отклика.

5) Оценка статистической значимости и определение степени влияния рассматриваемых факторов A_i :

$$A_i = \begin{cases} a_i & \text{при } t_i \geq T_\alpha(k-1) \\ 0 & \text{при } t_i < T_\alpha(k-1) \end{cases}; \quad (2.17)$$

где T_α – табличное значение коэффициента Стьюдента; k – количество экспериментов.

6) Расчет прогнозируемых нормированных значений функции отклика с учетом Y'' статистической значимости факторов:

$$Y''' = A_0 + \sum_{i=1}^n A_i \cdot X_i; \quad (2.18)$$

7) Расчет восстановленных (в реальном масштабе) значений функции отклика R' и R'' для нормированных рядов Y' и Y'' соответственно:

– для аддитивной модели:

$$R' = \frac{(Y' + I)}{2} \cdot (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min}; \quad (2.19) \quad R'' = \frac{(Y'' + I)}{2} \cdot (R_{\max} - R_{\min}) + R_{\min}; \quad (2.20)$$

– для мультипликативных моделей:

$$R' = \left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right)^{\frac{(Y' + I)}{2}} \cdot R_{\min}; \quad (2.21) \quad R'' = \left(\frac{R_{\max}}{R_{\min}} \right)^{\frac{(Y'' + I)}{2}} \cdot R_{\min}; \quad (2.22)$$

8) Оценка адекватности построенных моделей по величине F-критерия:

$$f' = \frac{\sigma_R}{\sigma_{R'}} > F_{1-\alpha}(k-1; k-1) \text{ или } f'' = \frac{\sigma_R}{\sigma_{R''}} > F_{1-\alpha}(k-1; k-1); \quad (2.23)$$

где σ_R , $\sigma_{R'}$ и $\sigma_{R''}$ – величины стандартных отклонений исходных данных и данных, полученных в результате прогнозирования, соответственно; $F_{1-\alpha}$ - табличное значение критерия Фишера.

Модель считается адекватной исходным данным с достоверностью не более α , если расчетное значение f-критерия превышает табличное значение критерия

Фишера. Окончательный выбор спецификации модели выполнялся исходя из оценки достоверности адекватной модели, степени влияния случайных факторов и величины средней погрешности расчета.

При проведении регрессионного анализа, а также при оценке достоверности предложенной уточненной методики расчета погрешности токарной обработки нежесткого вала и эффективности применения программного контура системы адаптивного управления в соответствии с методикой, приведенной в работе [65], была проведена статистическая обработка полученных экспериментальных данных, цель которой заключалась в определении необходимого количества опытов, отсеве грубых ошибок и оценке точности измерений. Статистическая обработка осуществлялась в несколько этапов:

1. Определение необходимого количества опытов:

Исходя из гипотезы о нормальном распределении измеряемой величины, заключение о необходимом количестве опытов для достижения требуемой точности при заданной доверительной вероятности определялось методом последовательного итерационного расчета в процессе получения и обработки данных по следующему выражению:

$$n = t_{\alpha, m}^2 \cdot \frac{S_x^2}{\Delta^2}; \quad (2.24)$$

где $t_{\alpha, m}$ – табличный коэффициент Стьюдента, зависящий от уровня значимости α и числа степеней свободы m ; S_x^2 - выборочная дисперсия; Δ - доверительный интервал.

Выборочное среднеквадратичное (стандартное) отклонение определялось по выражению (2.25) (первично исходя из трех измерений), а величины доверительного интервала - по выражению (2.26).

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}; \quad (2.25)$$

где x_i - значение измеряемого параметра; n – количество повторений эксперимента; \bar{x} - среднее значение измеряемого параметра; i - порядковый номер опыта.

$$\Delta = \pm \frac{t_{\alpha, m} \cdot S_x}{\sqrt{n}}; \quad (2.26)$$

где t - табличное значение критерия Стьюдента.

Среднее значение измеряемого параметра определялось по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i; \quad (2.27)$$

Таким образом, при проведении исследований для обеспечения требуемой точности при заданной доверительной вероятности в соответствии с выражением (2.24) каждый опыты повторялся от 4 до 16 раз для различных контролируемых параметров в зависимости от соотношения стандартного отклонения и доверительного интервала.

2. Отсев грубых погрешностей:

Так как параметры нормального распределения (математическое ожидание и генеральная дисперсия) неизвестны и оцениваются среднее значение выборки и выборочная дисперсия, оценка наличия грубой погрешности производилась только для одного из крайних значений выборки по критерию Смирнова-Граббса:

$$\eta = \frac{x_{\max} - \bar{x}}{S_x} \geq \eta_{\alpha,n}; \quad (2.28)$$

где x_{\max} - подозрительное значение; $\eta_{\alpha,n}$ - табличное значение критерия Смирнова-Граббса, зависящее от уровня значимости α и количества элементов в выборке n .

В случае если выполняется неравенство (2.28), то значение x_{\max} исключались из рассмотрения, а найденные ранее оценки подвергались корректировке с учетом отброшенного результата.

3. Оценка точности измерений:

Действительная погрешность измерения при многократных наблюдениях определялась исходя из следующего выражения:

$$\Delta x_{s,met} = t \cdot S_{x,met}; \quad (2.29)$$

где $S_{x,met}$ - средняя квадратическая погрешность измерения при многократных наблюдениях; t - коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P и числа равноточных результатов наблюдений, выполняемых для предварительной оценки M .

При этом, средняя квадратическая погрешность измерения при многократных наблюдениях параметра определялась по формуле:

$$S_{x,met} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^M (x_j - \bar{x})^2}{m \cdot (M - 1)}}; \quad (2.30)$$

где x_j - результат наблюдения; \bar{x} - результат измерения, полученный по многократным наблюдениям параметра (среднее арифметическое); M - число равнозначных результатов наблюдений, выполняемых для предварительной оценки; m - число наблюдений параметра, выполняемых при контроле в данном сечении

По результатам оценки точности измерений было установлено, что действительная точность измерений при проведении исследований соответствовала требуемой.

Выводы по главе 2.

Использование современного металлорежущего оборудования, лицензионного программного обеспечения, аттестованных средств измерения, зарегистрированных в Госреестре СИ, а также применение апробированных методик проведения экспериментальных исследований и статистической обработки экспериментальных данных, описанных в данной главе, позволило обеспечить получение достоверных результатов исследования.

Глава 3. Влияние технологических условий токарной обработки на геометрическую точность обработки нежесткого вала

В данной главе рассмотрено влияние упругих деформаций элементов технологической системы на точность формы и геометрических размеров обработанных нежестких валов. Произведен анализ влияния режимных параметров и условий обработки на величину радиальной составляющей силы резания, а также получены уточненные математические модели. На основании проведенных теоретических исследований предложена уточненная математическая модель процесса упругой деформации нежесткого вала обрабатываемого в опорах, а также уточненная математическая зависимость для определения ожидаемой в результате упругих деформаций технологической системы погрешности обработки, учитывающие физические особенности протекания процесса обработки. Предложенный математический аппарат показал большую сходимость с результатами проведенных экспериментальных исследований по сравнению с «традиционными» методиками расчета. Применение разработанной математической модели процесса формирования погрешности обработки, обусловленной упругими деформированиями технологической системы, в алгоритмах функционирования систем автоматического управления позволит повысить эффективность их применения практически в два раза.

3.1. Анализ влияния упругих деформаций элементов технологической системы под действием постоянной силы резания на точность обработки

Проведенный анализ работ, посвященных вопросам повышения точности токарной обработки нежестких валов и автоматического управления процессом обработки, показал, что используемые в них модели процесса упругого деформирования технологической системы недостаточно полно отражают поведение нежесткой заготовки в процессе обработки и носят упрощенный характер. Так, в большинстве случаев в моделях не учитывается изменение жесткостных параметров длинномерных заготовок по ходу обработки, влияние осевой составляющей силы резания и других факторов, оказывающих непосредственное влияние на ве-

личину деформаций в технологической системе, что обуславливает целесообразность создания более совершенной модели объекта управления.

Рассмотрим процесс формирования погрешности обработки, обусловленной упругими деформациями технологической системы, на примере обработки гладкого нежесткого вала с креплением в центрах. Данный вид крепления широко распространен, т.к. обеспечивает наиболее высокую точность и постоянство базирования обрабатываемых заготовок и для своего осуществления требует минимальных затрат времени по сравнению с другими способами крепления [91]. Хотя гладкие валы согласно данным, приведенные в работе [56], составляют всего 20% от общей номенклатуры изготавливаемых длинномерных валов, именно на примере их обработки наиболее видны характерные особенности обработки нежестких валов. На рисунке 3.1 показана схема базирования и распределение сил, действующих в процессе обработки. В приведенной схеме не учитывается действие центробежной силы инерции, влияние которой на величину упругих деформаций при полустойковой и чистовой обработке гладкого вала не существенно [9].

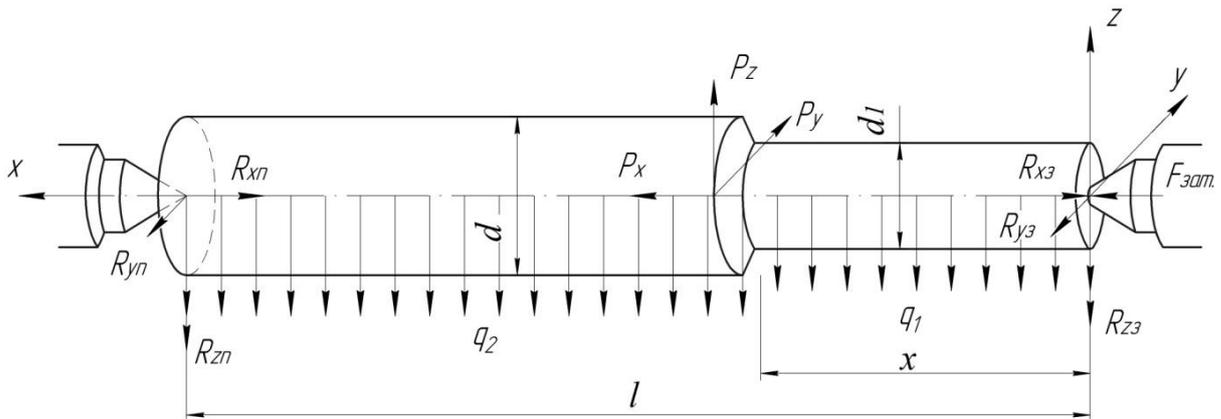


Рис. 3.1. Схема распределения сил, действующих в процессе обработки (плоскость резания изображена условно, на практике главный угол в плане при обработке деталей типа нежесткий вал составляет $90^\circ \div 95^\circ$)

При определении упругих деформаций системы прежде всего необходимо определить усилия, которые действуют на центра станка в процессе работы. Вал, установленный в центрах, представляет собой балку, свободно опирающуюся своими концами на опоры [123]. Тангенциальная составляющая силы резания P_z обуславливает появление реакций R_{zn} и R_{z3} , действующих соответственно на передний и задний центра, величина которых зависит от координаты точки приложения силы.

Кроме того, вес обработанного q_1 и обрабатываемого q_2 участков вала воспринимается центрами, и также оказывает влияние на величину реакций R_{ZII} и R_{Z3} . Радиальная составляющая силы резания P_Y обуславливает появление реакций R_{YII} и R_{Y3} , действующих на центра в горизонтальной плоскости перпендикулярно к оси центров станка, величина которых также зависит от координаты точки приложения силы. Кроме того на величину реакций R_{YII} и R_{Y3} , оказывает влияние момент в горизонтальной плоскости, вызванный действием осевой составляющей силы P_X , приложенной на расстоянии половины диаметра заготовки от линии центров станка. Сама сила P_X , вне зависимости от положения резца, действует в направлении к передней бабке, прижимая деталь к центру и целиком воспринимается им. Так как осевая составляющая силы действует в направлении от задней бабки к передней, разгружая тем самым задний центр, то, во избежание сползания вала, заднему центру сообщают предварительную затяжку $F_{ЗАТ}$ [10, 123]. Запишем вышесказанное в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} \sum Z = P_Z - R_{Z3} - R_{ZII} - q_1 \cdot x - q_2 \cdot (l - x) = 0; \\ \sum M_Y = P_Z \cdot x - R_{ZII} \cdot l - q_1 \cdot \frac{x^2}{2} - q_2 \cdot (l - x) \cdot \frac{(l + x)}{2} = 0; \\ \sum Y = P_Y - R_{Y3} - R_{YII} = 0; \\ \sum M_Z = P_Y \cdot x - R_{YII} \cdot l + P_X \cdot \frac{d}{2} = 0; \\ \sum X = P_X - R_{XII} - R_{X3} + F_{ЗАТ} = 0; \\ R_{X3} = F_{ЗАТ}. \end{cases} \quad (3.1)$$

где l – длина обрабатываемой заготовки; x – координата поперечного сечения, в котором определяется смещение; d – диаметр заготовки.

Решение системы уравнений (3.1) позволяет определить реакции опор:

$$\begin{cases} R_{Z3} = P_Z \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) - q_1 \left(x - \frac{x^2}{2 \cdot l}\right) - q_2 \frac{(l^2 - 2 \cdot x \cdot l - x^2)}{2 \cdot l}; \\ R_{ZII} = P_Z \cdot \frac{x}{l} - q_1 \frac{x^2}{2 \cdot l} - q_2 \frac{(l^2 + x^2)}{2 \cdot l}; \\ R_{Y3} = P_Y \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) - P_X \cdot \frac{d}{2 \cdot l}; \\ R_{YII} = P_Y \cdot \frac{x}{l} + P_X \cdot \frac{d}{2 \cdot l}; \\ R_{XII} = P_X; \\ R_{X3} = F_{ЗАТ}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Стоит отметить, что непосредственное влияние на точность обработки как в продольном, так и в поперечном направлении оказывают упругие деформации системы, обусловленные, прежде всего, действием радиальной составляющей силы резания P_Y и отчасти осевой составляющей P_X [91]. Что же касается деформаций под действием тангенциальной составляющей P_Z , то, они выражаются в основном в отжиме резца от заготовки и сползании заготовки с заднего центра, что также непосредственно влияет на точность обработки, однако данное влияние в сравнении с другими факторами настолько мало, что им, согласно [38, 50], можно пренебречь. Рассмотрим влияние каждой из составляющих силы P_Y и P_X в отдельности на каждый из элементов системы [10]:

1) *Изгиб оси вала под действием составляющей силы резания P_Y .*

При анализе изгиба оси вала под действием силы P_Y примем, что все узлы станка абсолютно жесткие. В практике технологии машиностроения для определения изгиба оси вала под действием силы P_Y широко используется формула расчета прогиба балки, свободно лежащей на опорах, заимствованная из дисциплины сопротивление материалов [59]:

$$y'_{li} = P_Y \cdot \varepsilon_{li} = P_Y \cdot \frac{x^2 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I \cdot l}; \quad (3.3)$$

где ε_{li} - податливость заготовки в рассматриваемом сечении; E - модуль упругости первого рода; I – момент инерции поперечного сечения обработанной заготовки.

Согласно данной формуле, вследствие переменного по ходу обработки значения величины податливости, обработанный вал в продольном сечении будет иметь бочкообразную форму, с максимум в среднем сечении. Разность между диаметрами посередине и на любом его конце определит величину погрешности формы Δ_1 в продольном сечении, возникающую в следствии упругих отжатий детали:

$$\Delta_1 = 2 \cdot y'_{li} \left(x_{\max} = \frac{l}{2} \right) = 2 \cdot \frac{P_Y \cdot l^3}{48 \cdot E \cdot I} = \frac{P_Y \cdot l^3}{24 \cdot E \cdot I}; \quad (3.4)$$

Выражение (3.3) и (3.4) достаточно точно отражают прогиб гладкого вала при его нагружении вне станка. Однако, механизм возникновения прогиба в процессе обработки существенно отличается случая статического нагружения вала. Так, с момента начала обработки гладкий вал становится двухступенчатым с не-

прерывно изменяющимся соотношением длин ступеней, вследствие чего постоянно изменяется и суммарный момент инерции I , а следовательно и податливости детали [9]. Расчетная схема представлена на рисунке 3.2.

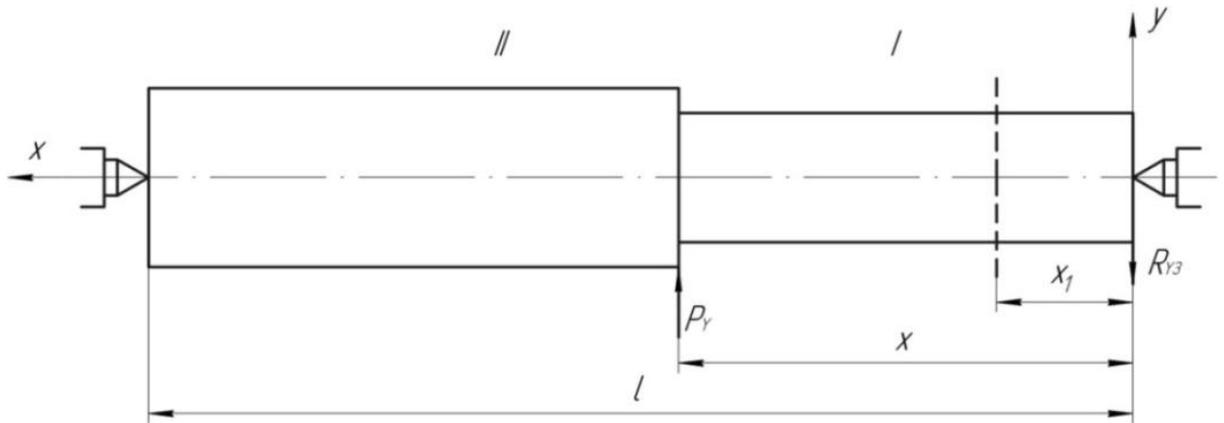


Рис. 3.2. Расчетная схема для определения изгиба оси вала под действием радиальной составляющей силы P_Y

Согласно энергетическому методу, величина изгиба вала y_{ii} в данном случае может быть найдена по следующему выражению:

$$y_{ii} = \int_0^x \frac{M_{PI} \cdot M_{II}}{E \cdot I_1} dx_1 + \int_x^l \frac{M_{PII} \cdot M_{III}}{E \cdot I_2} dx_1; \quad (3.5)$$

где M_{PI} , M_{II} – изгибающие моменты от радиальной составляющей силы резания P_Y и от единичной силы на обработанном участке; I_1 – момент инерции поперечного сечения обработанной ступени; M_{PII} , M_{III} – изгибающие моменты от радиальной составляющей силы резания P_Y и от единичной силы на обрабатываемом участке; I_2 – момент инерции поперечного сечения обрабатываемой ступени.

Исходя из расчетной схемы:

$$\begin{aligned} M_{PI} &= -R_{Y3} \cdot x_1 = -P_Y \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot x_1; \\ M_{II} &= -R'_{Y3} \cdot x_1 = -\left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot x_1; \\ M_{PII} &= -R_{Y3} \cdot x_1 + P_Y \cdot (x_1 - x) = -P_Y \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot x_1 + P_Y \cdot (x_1 - x); \\ M_{PII} &= -R'_{Y3} \cdot x_1 + I \cdot (x_1 - x) = -\left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot x_1 + (x_1 - x); \end{aligned} \quad (3.6)$$

Подставив выражения (3.6) в уравнение (3.5) и проинтегрировав его, после преобразований с учетом выражений (3.2) получим выражение по которому можно определить прогиб оси вала в каждом и сечений:

$$y_{ii} = \frac{P_Y \cdot x^3 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{P_Y}{E \cdot I_2} \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l-x) \cdot x^2 \right]; \quad (3.7)$$

Взяв от уравнения (3.7) первую производную и приравняв ее к нулю, найдем координату по длине обработки, в которой будет максимальное смещение оси вала:

$$x_{\max} = \frac{l \cdot \left(3I_2 - 7I_1 + 3\sqrt{I_1^2 - \frac{2 \cdot I_1 \cdot I_2}{9} + I_2^2} \right)}{10 \cdot (I_2 - I_1)}; \quad (3.8)$$

Исходя из выражения (3.8) максимальная величина погрешности поперечного сечения будет наблюдаться не посередине вала, как это принято считать в «традиционных» методиках расчета, а в сечении смещенном к передней бабке относительно середины детали на величину зависящую от соотношения моментов инерции обработанной и обрабатываемой ступеней (глубины резания), при этом профиль детали будет иметь бочкообразную форму описываемую параболой пятого порядка.

Подставив выражение (3.8) в выражение (3.7), получим:

$$y_{l\max} = P_Y \frac{l^3 \left(I_1 + I_2 + \frac{\sqrt{9 \cdot I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 + 9 \cdot I_2^2}}{3} \right) \cdot \left[3 \cdot I_1^2 - 14 \cdot I_1 \cdot I_2 + 3 \cdot I_2^2 + (I_1 + I_2) \cdot \sqrt{9 \cdot I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 + 9 \cdot I_2^2} \right]^2}{6250 \cdot E \cdot (I_1 - I_2)^4 \cdot I_1 \cdot I_2}; \quad (3.9)$$

Исходя из этого, величина ожидаемой погрешности формы вала Δ_1 , обусловленной изгибом оси детали под действием радиальной составляющей силы резания может быть определена из выражения:

$$\Delta_1 = P_Y \frac{l^3 \left(I_1 + I_2 + \frac{\sqrt{9 \cdot I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 + 9 \cdot I_2^2}}{3} \right) \cdot \left[3 \cdot I_1^2 - 14 \cdot I_1 \cdot I_2 + 3 \cdot I_2^2 + (I_1 + I_2) \cdot \sqrt{9 \cdot I_1^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 + 9 \cdot I_2^2} \right]^2}{3125 \cdot E \cdot (I_1 - I_2)^4 \cdot I_1 \cdot I_2}; \quad (3.10)$$

Таким образом, согласно полученному выражению, величина данной погрешности обработки зависит не только от величины силы резания, длины и материала обрабатываемой детали, диаметра обработки, но и от диаметра заготовки. Разница между диаметром обработки и диаметром заготовки характеризуется

По ходу обработки при перемещении резца от задней бабки к передней отжатие заднего центра уменьшается до нуля, при этом передний центр начнет испытывать нагрузку в результате чего возникнет его отжатие y_{II} увеличивающееся по ходу обработки. При крайнем левом положении резца отжатие переднего центра достигнет своего максимума. Таким образом, упругие отжатия бабок вызывают непрерывные изменения положения оси вала, вследствие чего возникает погрешность обработки в виде корсетности. Кривая A_1aB_1 на рисунке 3.3, выражает собой искаженный профиль вала. Прямая A_iB_i , является осью смещенного вала при расположении резца на расстоянии i от заднего центра. Пересечение линии A_iB_i с осью резца дает точку b , ордината которой y_{2i} выражает собой увеличение радиуса вала в данном поперечном сечении вследствие отжатия центров. Величина погрешности y_{2i} может быть найдена аналитически, исходя из подобия треугольников A_iCb и A_idB_i :

$$\frac{x}{l} = \frac{y_{2i} - y_{3i}}{y_{II} - y_{3i}}; \quad (3.12)$$

Откуда

$$y_{2i} = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot y_{3i} + \frac{x}{l} \cdot y_{II}; \quad (3.13)$$

Так как деформация бабок прямо пропорциональна нагрузкам, то с учетом выражений (3.2) можно записать:

$$\begin{cases} y_{3i} = P_Y \cdot \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot \varepsilon_3; \\ y_{II} = P_Y \cdot \frac{x}{l} \cdot \varepsilon_{II}. \end{cases} \quad (3.14)$$

Подставив выражения (3.14) в выражение (3.13), получим уравнение линии профиля оси вала обрабатываемого на отжимающихся центрах:

$$y_{2i} = P_Y \cdot \left[\left(1 - \frac{x}{l}\right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l}\right)^2 \cdot \varepsilon_{II} \right]; \quad (3.15)$$

Для определения величины корсетности Δ_2 , возникающей вследствие отжатия центров, найдем максимальное $y_{2\max}$ и минимальное $y_{2\min}$ смещения системы бабок. Взяв от выражения (3.15) первую производную и приравняв ее к нулю, найдем координату по длине обработки, в которой будет минимальное смещение оси вала:

$$x_{\min} = l \cdot \frac{\varepsilon_3}{\varepsilon_{II} + \varepsilon_3}; \quad (3.16)$$

Подставив выражение (3.16) в уравнение (3.15), получим:

$$y_{2\min} = P_Y \cdot \frac{\varepsilon_{II} \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_{II} + \varepsilon_3}; \quad (3.17)$$

Максимальное смещение оси вала $y_{2\max}$ в свою очередь будет наблюдаться у бабки с максимальной податливостью:

$$\begin{cases} y_{2\max} = P_Y \cdot \varepsilon_3 & \text{при } \varepsilon_{II} \leq \varepsilon_3; \\ y_{2\max} = P_Y \cdot \varepsilon_{II} & \text{при } \varepsilon_{II} > \varepsilon_3; \end{cases} \quad (3.18)$$

Таким образом, продольная погрешность формы вала, обусловленная деформациями бабок, может быть определена из выражения:

$$\begin{cases} \Delta_2 = P_Y \cdot \left(\varepsilon_3 - \frac{\varepsilon_{II} \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_{II} + \varepsilon_3} \right) & \text{при } \varepsilon_{II} \leq \varepsilon_3; \\ \Delta_2 = P_Y \cdot \left(\varepsilon_{II} - \frac{\varepsilon_{II} \cdot \varepsilon_3}{\varepsilon_{II} + \varepsilon_3} \right) & \text{при } \varepsilon_{II} > \varepsilon_3; \end{cases} \quad (3.19)$$

3. Отжатие суппорта под действием радиальной составляющей силы P_Y .

Опыт эксплуатации отечественных и зарубежных станков показал, что податливость суппорта ε_C в случае его надлежащей сборки и исправного состояния остается практически постоянной на всей длине обработки. При условии постоянства силы P_Y , его отжатие равно:

$$y_3 = y_{3\max} = P_Y \cdot \varepsilon_C; \quad (3.20)$$

Таким образом, отжатие суппорта не вызывает появления погрешности формы обтачиваемого вала, однако вызывает увеличение его диаметра:

$$\Delta_3 = 2 \cdot y_3 = 2 \cdot P_Y \cdot \varepsilon_C; \quad (3.21)$$

4. Изгиб оси вала под влиянием осевой составляющей силы резания P_X .

Приложенная на расстоянии $d/2$ от оси вращения она создает крутящий момент M_X , под влиянием которого возникают реакции P'_3 и P'_{II} , действующие соответственно на заднюю и переднюю бабки станка в противоположные стороны:

$$P'_3 = P'_{II} = P_X \cdot \frac{d}{l}; \quad (3.22)$$

Под действием возникающего изгибающего момента, ось вала изгибается на угол θ , в результате чего возникает продольная деформация оси вала y_{4i} , как показано на рисунке. 3.4.

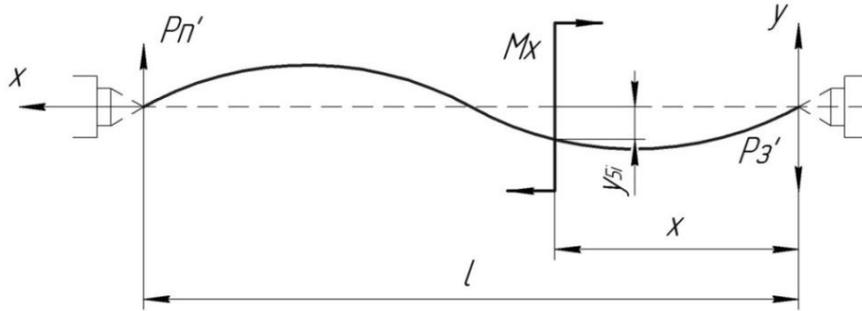


Рис. 3.4. Расчетная схема для определения изгиба оси вала под действием момента M_x

Уравнение изгибающего момента в сечении x для данного случая имеет вид:

$$M = P_3' \cdot x - M_x = P_x \cdot \frac{d}{2 \cdot l} \cdot x - P_x \cdot \frac{d}{2}; \quad (3.23)$$

Запишем уравнения упругой линии для рассматриваемого случая:

$$\begin{cases} \theta(x) = \theta_0 + \frac{P_x \cdot d \cdot x^2}{2 \cdot E \cdot I_1 \cdot l} - \frac{P_x \cdot d \cdot x}{2 \cdot E \cdot I_1}; \\ y_{4i} = y(x) = \theta_0 \cdot x + \frac{P_x \cdot d \cdot x^3}{6 \cdot E \cdot I_1 \cdot l} - \frac{P_x \cdot d \cdot x^2}{4 \cdot E \cdot I_1}; \end{cases} \quad (3.24)$$

где θ_0 — начальный угол поворота сечения заготовки.

Для определения постоянной интегрирования θ_0 воспользуемся граничными условиями. В точках, соответствующих $x=0$, и $x=l$, диаметры вала не искажаются, тогда:

$$\theta_0 = \frac{P_x \cdot d \cdot l}{12 \cdot E \cdot I_1}; \quad (3.25)$$

Таким образом, величина деформации оси вала, вызванной действием момента M_x , может быть определена по следующему выражению:

$$y_{4i} = \frac{P_x \cdot d \cdot l \cdot x}{12 \cdot E \cdot I_1} \cdot \left(2 \cdot \frac{x^2}{l^2} - 3 \frac{x}{l} + 1 \right); \quad (3.26)$$

Взяв от выражения (3.26) первую производную и приравняв ее к нулю, найдем координаты по длине обработки, в которых будет максимальное смещение оси вала:

$$x_{4\max} = \frac{3 \pm \sqrt{3}}{6} \cdot l; \quad (3.27)$$

Анализ выражений (3.26) - (3.27) показал, что вследствие изгиба оси, вызванного действием момента M_X , обточенный вал приобретает продольную погрешность формы Δ_4 , причем, правая половина вала получает погрешность в виде вогнутости (корсетность), а левая - в виде такой же по величине выпуклости (бочкообразность). Подставив выражение (3.27) со знаком плюс в выражение (3.26), получим:

$$y_{4\max} = P_X \frac{\sqrt{3} \cdot l^2 \cdot d}{216 \cdot E \cdot I_1}; \quad (3.28)$$

Таким образом, величина погрешности формы вала, обусловленная действием момента M_X может быть определена из выражения:

$$\Delta_4 = 2 \cdot y_{4\max} = P_X \frac{\sqrt{3} \cdot l^2 \cdot d}{108 \cdot E \cdot I_1}. \quad (3.29)$$

5. *Смещение линии центров под действием момента, создаваемого осевой составляющей силы резания P_X .*

В процессе обработки, обе бабки, имеющие неодинаковую податливость, под действием возникающих усилий реакций опор P'_3 и P'_Π смещаются в противоположные стороны на разные величины y'_3 и y'_Π , вследствие чего вал поворачивается в горизонтальной плоскости, проходящей через линию центров, как показано на рисунке 3.5. Величина этих реакций может быть определена из выражения:

$$P'_3 = P'_\Pi = P_X \cdot \frac{d}{2 \cdot l}; \quad (3.30)$$

Если считать вал абсолютно жестким, то смещенное положение оси A_1B_1 , останется неизменным на протяжении всей длины обтачивания. При этом диаметральные размеры вала изменятся на величину удвоенного смещения оси y_{5i} , которое исходя из подобия треугольников BAc и Bdc можно определить из геометрического соотношения:

$$\frac{l-x}{l} = \frac{y_{5i} + y'_\Pi}{y'_\Pi + y'_3}; \quad (3.31)$$

Откуда

$$y_{5i} = \left(1 - \frac{x}{l}\right) \cdot y'_3 - \frac{x}{l} \cdot y'_\Pi; \quad (3.32)$$

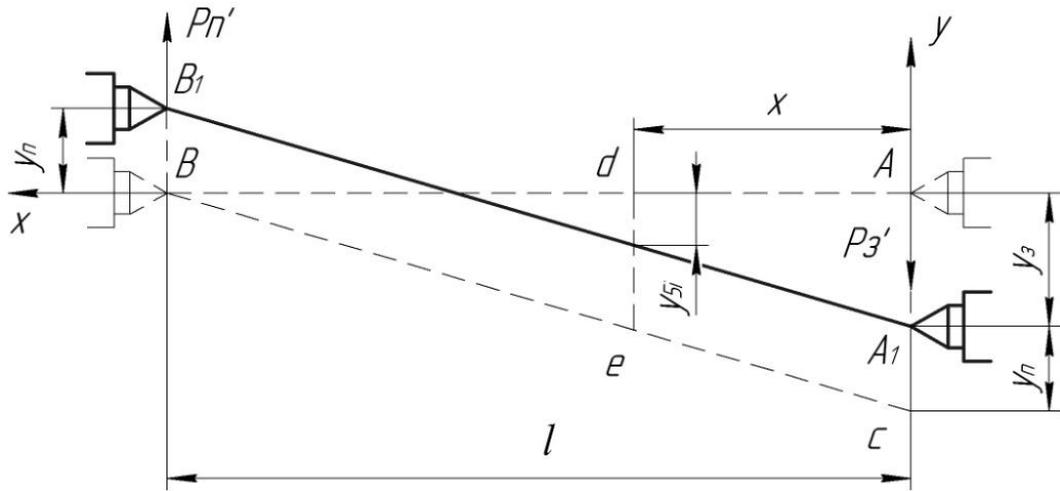


Рис. 3.5. Расчетная схема для определения смещения линии центров под действием момента создаваемого осевой составляющей силы резания P_x .

Так как деформация бабок прямо пропорциональна нагрузкам и неизменна по ходу обработки, то можно записать:

$$\begin{cases} y_3' = P_3' \cdot \varepsilon_3 = P_x \frac{d}{2 \cdot l} \cdot \varepsilon_3; \\ y_{п'} = P_{п'} \cdot \varepsilon_{п'} = P_x \frac{d}{2 \cdot l} \cdot \varepsilon_{п'}. \end{cases} \quad (3.33)$$

Подставив выражения (3.33) в выражение (3.32), получим уравнение линии профиля вала:

$$y_{5i} = P_x \cdot \frac{d}{2 \cdot l} \cdot \left[\left(1 - \frac{x}{l} \right) \cdot \varepsilon_3 - \left(\frac{x}{l} \right) \cdot \varepsilon_{п'} \right]; \quad (3.34)$$

Выражение (3.34) позволяет определить искажение диаметра вала, вызванное смещением бабок в поперечном сечении под действием силы P_x , в любом его сечении. В результате такого смещения бабок, обточенный вал получится коническим. Причем меньшее основание конуса будет у правого торца, а большее основание у левого. Диаметр без искажения получится в сечении, проходящем через точку пересечения смещенной оси A_1B_1 с исходной AB , координата которой исходя из выражения (3.34) может быть найдена по следующей зависимости:

$$x_{\min} = \frac{\varepsilon_3}{(\varepsilon_3 + \varepsilon_{п'})} \cdot l; \quad (3.34)$$

Максимальное смещение оси вала $y_{5\max}$ в свою очередь будет наблюдаться у бабки с максимальной податливостью:

$$\begin{cases} y_{5\max} = P_X \cdot \frac{d}{2 \cdot l} \cdot \varepsilon_3 \text{ при } \varepsilon_{II} \leq \varepsilon_3; \\ y_{5\max} = P_X \cdot \frac{d}{2 \cdot l} \cdot \varepsilon_{II} \text{ при } \varepsilon_{II} > \varepsilon_3; \end{cases} \quad (3.35)$$

Исходя из вышесказанного, величина конусности выразится:

$$\Delta_5 = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{2 \cdot l} = \frac{y'_{II} + y'_3}{l} = P_X \cdot \frac{d}{2 \cdot l^2} \cdot (\varepsilon_3 + \varepsilon_{II}); \quad (3.36)$$

Также под действием силы P_X отжимается, изгибается и поворачивается резец, однако эти деформации столь малы, что практически не оказывают влияния на точности диаметральных размеров обработанного вала и ими можно пренебречь [91].

Для оценки степени влияния упругих деформаций и отжаты элементов технологической системы на точность обработки, был произведен их расчет для различных диаметров и длин обработки. Расчеты проводились для случая чистовой токарной обработки ($t=0,5$ мм) стали 20ХН твердосплавными пластинами из твердого сплава ВК6 при скорости резания $V=100$ м/мин и подаче $S=0,166$ мм/об. Величина радиальной составляющей силы резания P_Y определена по зависимости, приведенной в работе [62], осевой составляющей силы резания P_X - по зависимости, приведенной в работе [144]. Величина податливости элементов технологической системы определялась в соответствии с таблицей 2.1. Результаты расчета представлены в таблице 3.1.

Согласно произведенным расчетам, величина смещения линии центров $y_{5\max}$ под действием момента M_X незначительна в сравнении с величиной общей упругой деформации системы, ввиду чего данным видом погрешности можно пренебречь, а изгиб оси вала $y_{4\max}$, вызываемый действием момента M_X , может оказывать существенное влияние лишь при обработке весьма тонких валов (диаметром до 20 мм и отношением длины к диаметру более 15), однако при этом изгиб оси от действия радиальной составляющей силы P_Y оказывается настолько велик, что изгибом оси вала, вызываемым действием момента M_X можно пренебречь. Кроме того, при таком соотношении длины к диаметру обработка не представляется возможной без применения дополнительных опор, увеличивающих жесткость заготовки, в виду неизбежного возникающих вибраций [97].

Таблица 3.1 – Результаты расчета величин упругих деформаций и смещений элементов технологической системы

Диаметр обработанной детали d, мм	Величина погрешности обработки, мм				
	Y _{1max}	Y _{2max}	Y _{3max}	Y _{4max}	Y _{5max}
l/d=8					
10	0,03857	0,01207	0,01410	0,00154	0,00053
20	0,02082	0,01207	0,01410	0,00077	0,00053
40	0,01088	0,01207	0,01410	0,00038	0,00053
80	0,00557	0,01207	0,01410	0,00019	0,00053
l/d=12					
10	0,13018	0,01207	0,01410	0,00345	0,00035
20	0,07027	0,01207	0,01410	0,00173	0,00035
40	0,03671	0,01207	0,01410	0,00086	0,00035
80	0,01879	0,01207	0,01410	0,00043	0,00035
l/d=15					
10	0,25427	0,01207	0,01410	0,00540	0,00028
20	0,13724	0,01207	0,01410	0,00270	0,00028
40	0,07169	0,01207	0,01410	0,00135	0,00028
80	0,03670	0,01207	0,01410	0,00067	0,00028
l/d=25					
10	1,17715	0,01207	0,01410	0,01499	0,00017
20	0,63539	0,01207	0,01410	0,00750	0,00017
40	0,33191	0,01207	0,01410	0,00375	0,00017
80	0,16989	0,01207	0,01410	0,00187	0,00017

Таким образом, анализ погрешностей обработки, вызываемых упругими деформациями и отжатыми элементами технологической системы, показал, что существенное влияние на точность обработки оказывают упругие деформации под действием радиальной составляющей силы P_Y , а именно: изгиб оси вала; смещение линии центров; отжатие суппорта.

Таким образом, величина упругих деформаций технологической системы с достаточной степенью точности может быть найдена по выражению:

$$y_{\Sigma i} = P_Y \cdot (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = P_Y \left\{ \frac{x^3 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{l}{E \cdot I_2} \cdot \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l-x) \cdot x^2 \right] + \left(1 - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{II} + \varepsilon_C \right\}; \quad (3.37)$$

Исходя из этого, величина погрешности обработки, вызванной упругими деформациями элементов технологической системы, в каждом из сечений может быть определена по следящему выражению:

$$\Delta_{\Sigma i} = 2 \cdot (y_1 + y_2 + y_3) = 2 \cdot P_Y \left\{ \frac{x^3 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{l}{E \cdot I_2} \cdot \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - \right. \right. \\ \left. \left. - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l-x) \cdot x^2 \right] + \left(l - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{II} + \varepsilon_C \right\}; \quad (3.38)$$

3.2. Анализ влияния режимных параметров и условий обработки на величину радиальной составляющей силы резания. Построение уточненных математических моделей

На сегодняшний день наиболее широкое распространение в справочной литературе получил расчетно-аналитический метод расчета величины радиальной составляющей силы резания, заключающийся в её определении по математическим зависимостям, полученным при проведении практических исследований. В общем виде зависимость для расчета радиальной составляющей силы резания согласно расчетно-аналитическому методу может быть выражена следующим образом [102-105]:

$$P_Y = C_{P_Y} \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^n \cdot K_p, \quad (3.39)$$

где C_{P_Y} - безразмерный коэффициент, зависящий от группы обрабатываемого материала и материала режущей части инструмента, а также вида обработки; t - глубина резания, мм; S - подача, мм/об; V - скорость резания, м/мин; K_p - поправочный коэффициент; x, y, n - показатели степени для конкретных условий обработки.

Поправочный коэффициент K_p , в свою очередь, является произведением ряда коэффициентов, учитывающих влияние геометрию резания и физико-механические свойства обрабатываемого материала на условия обработки:

$$K_p = K_\varphi \cdot K_\gamma \cdot K_\lambda \cdot K_r \cdot K_{Pm}, \quad (3.40)$$

где K_φ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние главного угла в плане φ ; K_γ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние переднего угла резца γ ; K_λ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние угла наклона главной режущей

кромки резца λ ; K_r - поправочный коэффициент, учитывающий влияние радиуса при вершине резца r ; K_{pm} - поправочный коэффициент, учитывающий механические свойства обрабатываемого материала, который рассчитывается по формуле (3.41).

$$K_{pm} = \left(\frac{\sigma_{вр}}{750} \right)^{n_p}, \quad (3.41)$$

где n_p - показатель степени; $\sigma_{вр}$ – предел прочности обрабатываемого материала, МПа.

Кроме того, в справочной литературе и в практике машиностроения также нашел применение табличный способ расчета, основанный на определении составляющих силы резания по таблицам, составленным на основании опыта машиностроительных предприятий, и применении укрупненных поправочных коэффициентов, учитывающих технологические особенности обработки [33, 73, 96]. Однако, данные в литературе приведены для конкретных условий обработки, что существенно ограничивает область применения табличного метода. Так, например, в справочнике [33] приведены значения составляющих силы резания только для обработки с глубиной резания два и более мм. При этом, в большинстве случаев, авторы приводят данные лишь для определения тангенциальной составляющей силы резания P_z , а величину радиальной составляющей P_y предполагается определять исходя из соотношения, приближенно отображающего распределение составляющих силы в процессе обработки: $P_y: P_z=0,4\div 0,5$. Однако, это соотношение непосредственно зависит множества факторов (сечение снимаемой стружки, скорость резания, геометрия резания и т.д.), влияющих на условия обработки, поэтому может быть принято достаточно условно и зачастую не отражает реальных условий обработки. Так, в работе [9] приведены результаты экспериментов, согласно которым, при глубине резания $t=0,25$ мм и подаче $s=0,6$ мм/об, что соответствует условиям чистовой обработки, соотношение $P_y: P_z$ составляет 1,13, а при глубине резания $t=4,75$ мм и подаче $s=0,4$ мм/об, что соответствует условиям черновой обработки, соотношение $P_y: P_z$ составляет 0,28 (см. рисунок 3.6).

С целью анализа степени достоверности различных методик расчета радиальной составляющей силы резания, в рамках данного исследования был произведе-

ден расчет значений P_Y для одинаковых условиях обработки по нескольким справочникам (расчетно-аналитическим и табличным), результаты которого приведены в таблице 3.2. Также, в таблице приведены результаты измерения фактического значения радиальной составляющей силы резания при наружном продольном точении различных материалов инструментом из твердого сплава, полученные экспериментально. Данные были получены при чистовой токарной обработке стале 20ХН, 30ХМА проходным резцом PWLNR 2525-M08 ($\varphi=95^\circ$; $\gamma=-6^\circ$; $\lambda=-6^\circ$) со сменными твердосплавными пластины тригональной формы WNUM 080408 ($r=0,8$ мм) из твердого сплава марок Т15К6, ВК6, ТН20 при следующих режимах резания: $V=180$ м/мин; $S=0,166$ мм/об; $t=0,5$ мм.

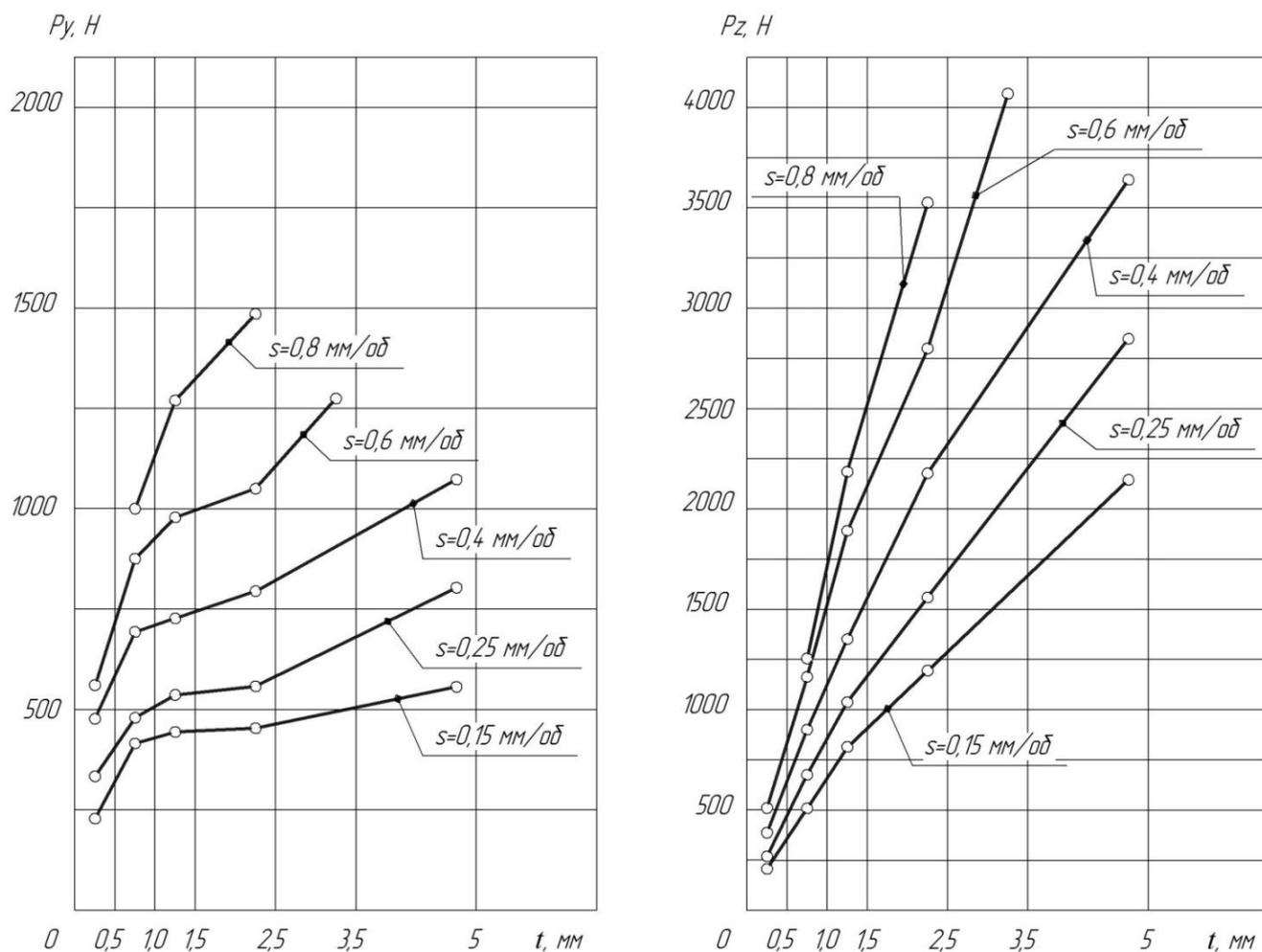


Рис. 3.6. Зависимость радиальной P_Y и тангенциальной P_Z составляющих силы резания от глубины резания t при различных подачах [9].

Таблица 3.2 – Величины радиальной составляющей силы резания P_Y , при обработке сталей различными марками твердого сплава

Материал заготовки	Расчетное значение P_Y , Н		Разброс расчетных значений P_Y , %	Материал режущей части резца					
				BK6		T15K6		TN20	
				Измеренные значения P_Y , Н					
				P_Y	Δ^1 , %	P_Y	Δ^1 , %	P_Y	Δ^1 , %
Сталь 20ХН	[105]	59	375	302	-411	322	-444	353	-497
	[103]	61			-399		-432		-483
	[96]	281			-7,4		-14		-26
Сталь 30ХМА	[105]	67	336	239	-254	271	-302	326	-383
	[103]	77			-211		-254		-325
	[96]	294			18		7,7		-11

Примечания: ¹ – величина расхождения значений радиальной составляющей силы резания определенных расчетным и экспериментальным путем.

На основании данных, представленных в таблице 3.2 можно предварительно сделать следующие выводы:

1) Расчетные значения радиальной составляющей силы резания P_Y , полученные с использованием расчетно-аналитического и табличного методов расчета при условиях чистовой токарной обработки, значительно (более чем на 300%) отличаются друг от друга. При этом большей сходимостью с результатами экспериментов обладают данные полученные табличным методом. Причиной такого значительного расхождения может являться некорректный учет или вообще отсутствие учета множества параметров в математических моделях.

2) Величина составляющей силы резания непосредственно зависит не только от свойства обрабатываемого материала, как это принято в существующих расчетно-аналитических методиках расчета, но и от свойств инструментального материала.

Аналогичные образом, в работах [89, 90] были получены расчетные (по методике [105]) и экспериментальные значения радиальной составляющей силы резания для условий получистовой обработки сталей с различными прочностными свойствами (от 460 МПа до 930 МПа.) резцом с режущей частью из твердого сплава Т30К4 при следующих условиях обработки: $V=110$ м/мин; $S=0,3$ мм/об; $t=2$ мм; $\varphi=45^\circ$; $\gamma=0^\circ$; $\lambda=0^\circ$; $r=1$ мм. Результат их сопоставления, представленный на

рисунке 3.7, показал, что зависимость величины радиальной составляющей сил резания P_Y от предела прочности обрабатываемого материала $\sigma_{вр}$ имеет не прямо пропорциональный характер, как это выражено формулами (3.39) - (3.41), а носит обратный характер, что подтверждает гипотезу, выдвинутую в работе [115], о противоположном влиянии увеличения прочностных свойств исследуемых сталей на величину составляющих силы резания. При этом максимальное, более чем двукратное, отклонение расчетных значений от полученных экспериментально наблюдается для сталей имеющих низкий предел прочности. По мере увеличения прочностных свойств обрабатываемых сталей величина ошибки расчета уменьшается и, при значениях предела прочности близких к 750 МПа, достигает приемлемого значения (15-20%, согласно [89, 90]), а при дальнейшем увеличении прочностных свойств величина ошибки расчета вновь возрастает, меняя свой знак.

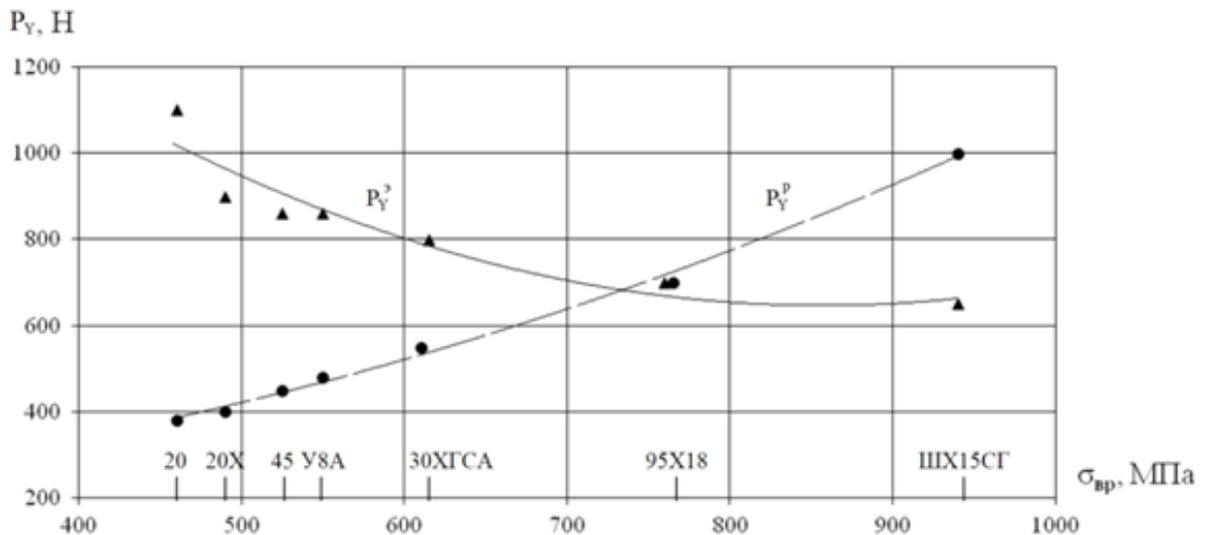


Рис. 3.7. Характер изменения радиальной составляющей силы резания при обработке сталей с различными прочностными свойствами ($P_{YЭ}$ – экспериментальная кривая; $P_{YР}$ – расчетная кривая) [89]

Существует ряд взаимосвязанных причин такого расхождения расчетных данных с результатами, полученными экспериментально:

Во-первых, математические модели, положенные в основу расчетно-аналитического метода, основаны на положениях "условной" схемы резания, согласно которой сопротивление пластическому деформированию по плоскости сдвига пропор-

ционально прочностным характеристикам металла, полученным при статических испытаниях в условиях комнатных температур, при скоростях деформации металла на разрывных машинах $\varepsilon = 10^{-2} \div 10^{-3} \text{ с}^{-1}$, что не отражает реального состояния срезаемых объемов металла. Так, в процессе обработки протекают два конкурирующих процесса - деформационное упрочнение, определяемое физико-механическими свойствами, и температурное разупрочнение, определяемое теплофизическими свойствами. Это позволяет говорить о совместном противоположном влиянии различных свойств материала на силовые характеристики процесса резания, и, в частности, на величину радиальной составляющей силы резания, что не учитывается в "традиционных" методиках расчета. При этом, влияние теплопроводности при высоких температурах (близких или превышающих температуру Дебая) может оказать решающее значение. Так, в работе [115], отмечено, что увеличение теплопроводности материала обрабатываемой детали приведет к увеличению горизонтальных (радиальной и осевой) составляющих силы резания. Данная закономерность характерна для обработки сталей перлитного и ферритного классов. На рисунке 3.8, приведённом в работе [89], показан характер изменения радиальной составляющей силы резания P_Y в зависимости от теплопроводности обрабатываемого материала, подтверждающий данное положение. Обработка сталей велась с теми же геометрическими параметрами при тех же режимах резания, что и при построении графика, представленного на рисунке 3.7.

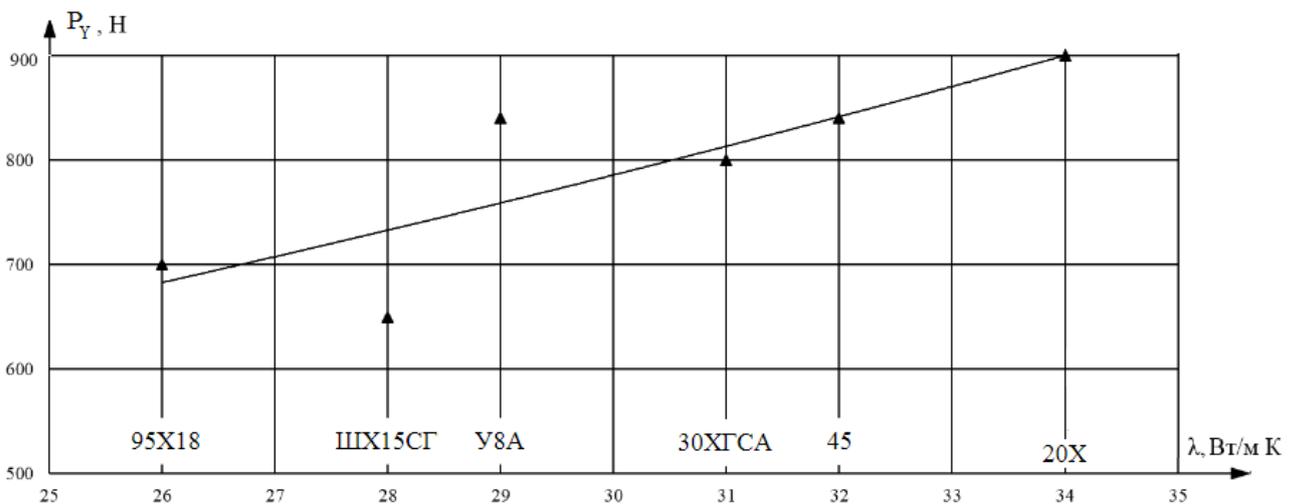


Рис. 3.8. Характер изменения радиальной составляющей силы резания при обработке сталей с различной теплопроводностью инструментом из твердого сплава Т30К4 [89]

Во-вторых, эмпирический коэффициент $C_{рх}$ в формуле (2.11), зависящий от группы обрабатываемого материала и материала режущей части инструмента и характеризующий влияние их теплофизических и физико-механических свойств на величину составляющей P_Y , принят постоянными для сочетания конструкционная сталь - твердосплавный инструмент, и соответственно равной 243. Однако, фактически величина этого коэффициента зависит от теплофизических свойств конкретной пары контактирующих материалов. Эту гипотезу подтверждают данные об изменении радиальной составляющей силы резания при токарной обработке стали 25 (перлитного класса) различными марками твердосплавного инструмента, приведенные в работе [89] и представленные на рисунке 3.9. Обработка сталей велась с теми же геометрическими параметрами при тех же режимах резания, что и при построении графика, представленного на рисунке 3.7.

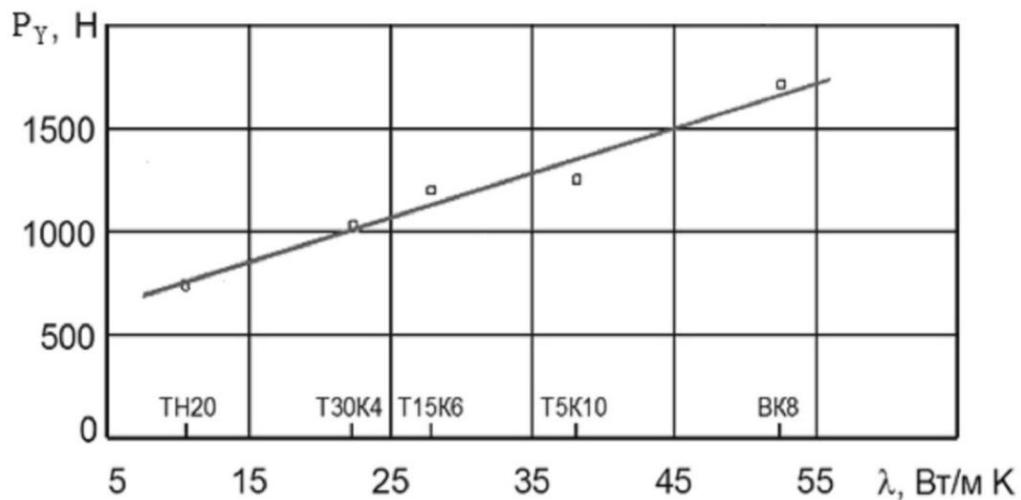


Рис. 3.9. Характер изменения радиальной составляющей силы резания при обработке стали 25 твердыми сплавами с различной теплопроводностью [89]

На приведенном графике видно, что с увеличением теплопроводности твердосплавного материала, величина радиальной составляющей силы резания увеличивается, в то время как величина показателя степени n_p в формуле (3.41) и коэффициента C_p в формуле (3.39), учитывающие влияние физико-механических и теплофизических свойств материалов контактируемых пар (инструмент - деталь) на величину составляющей силы, согласно [102-105], приняты постоянными для всей группы

твердых сплавов. Таким образом, в формуле (3.39) никак не учитывается влияние конкретной марки твердосплавного инструмента и её теплофизических свойств на процесс резания. Однако, в работе [52] отмечено, что с увеличением содержания карбидов в твердом сплаве сила резания и её составляющие уменьшаются, что объясняется изменением коэффициента трения сходящей стружки по передней поверхности инструмента [115]. Данное обстоятельство также вносит существенную погрешность в методику расчета.

Таким образом, анализ расчетно-аналитических методик определения радиальной составляющей силы резания в зависимости от условий обработки показал, что заложенные в их основу математические зависимости допускают большой процент ошибки. Данные модели достаточно точно описывают процесс в диапазоне скоростей резания в пределах 50-60 м/мин, когда преобладает процесс деформационного упрочнения (температура в зоне резания значительно ниже температуры Дебая), но не применимы в современных условиях производства, когда скорости резания превышают 90 м/мин, когда наблюдается преобладание температурного разупрочнения металла (температура в зоне резания превышает температуру Дебая). Таким образом, их использование в автоматизированных способах расчета параметра регулирования, а также построение на их основе математических моделей управления автоматическими системами не обеспечит надёжности выполняемого процесса резания. Табличный же метод, хотя и обладает большей сходимостью с результатами экспериментов, не содержит в достаточной мере информации о взаимосвязи режимных параметров обработки с силовыми характеристиками процесса резания, следовательно, не может быть применим для автоматического управления процессом обработки. Помимо этого, обращает на себя внимание изменение характера зависимости радиальной составляющей силы резания от глубины резания в условиях чистовой обработки (см. рисунок 3.6), что может быть обусловлено изменением характера деформирования и стружкообразования на тонких срезах, а также с изменением направления схода стружки. Данные обстоятельства обусловили необходимость разработки уточненной математической модели процесса формирования радиальной составляющей силы резания при чистовой токарной обработке.

Исследования процесса формирования радиальной составляющей силы резания проводились в соответствии с методикой подробно описанной в параграфе 2.3. В качестве обрабатываемых материалов были выбраны стали марок: 20, 20ХН, 30ХМА, чье назначение, химический состав, механические и физические свойства описаны в параграфе 2.2. Хотя сталь 20 практически не используется при изготовлении нежестких валов, однако, её выбор был обусловлен низким коэффициентом теплопроводности материал, характерным для группы углеродистых конструкционных сталей, что позволит расширить область применения разработанной методики управления точностью обработки. Исследования проводились в соответствии мультипликативной моделью полнофакторного эксперимента 3^4 (см. таблицу 3.3). В качестве факторов, определяющих значение функции отклика (P_Y), были выбраны: скорость резания V (90, 135, 180 м/мин), подача S (0,083; 0,166; 0,256 мм/об), глубина резания t (0,5; 0,7; 1 мм) и теплопроводность инструментального материала λ (11, 27, 50 Вт/мК). В качестве режущего инструмента использовалась державка динамометра ДКМ-2010 со сменными многогранными твердосплавными режущими пластинами WNUM 080408 из следующих материалов: ВК6, Т15К6, ТН20.

Таблица 3.3 – Матрица планирования экспериментов и результаты опытов

№ опыта	Фактические результаты опыта							Нормированные значения			
	$\Phi_1(t)$	$\Phi_2(V)$	$\Phi_3(S)$	$\Phi_4(\lambda)$	$R(P_Y)$			Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
					Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА				
1	0,5	90	0,083	11	386	302	259	-1	-1	-1	-1
2	0,5	90	0,083	27	392	326	307	-1	-1	-1	0
...											
80	1	180	0,256	27	623	519	492	1	1	1	0
81	1	180	0,256	50	681	551	544	1	1	1	1

Статистическая обработка экспериментальных данных и регрессионный анализ проводились в соответствии с методикой описанной в параграфе 2.6. На основании расчетов коэффициентов парной корреляции, было установлено, что вы-

бренные факторы являются попарно независимыми и каждый из них оказывает влияние на величину функции отклика (см. табл.3.4).

Таблица 3.4 – Расчетные значения коэффициентов парной корреляции

Сравниваемые величины		Значение коэффициента парной корреляции			Существование линейной зависимости	Характер линейной зависимости
		Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА		
$\Phi_1(t)$	$R(P_Y)$	0,4867	0,4320	0,4108	вероятно	возрастающая
$\Phi_2(U)$	$R(P_Y)$	-0,4854	-0,4537	-0,4773	вероятно	убывающая
$\Phi_3(S)$	$R(P_Y)$	0,6704	0,7063	0,6879	вероятно	возрастающая
$\Phi_4(\lambda)$	$R(P_Y)$	0,2027	0,2370	0,3079	маловероятно	возрастающая
$\Phi_2(V)$	$\Phi_3(S)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-
$\Phi_2(V)$	$\Phi_4(\lambda)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-
$\Phi_2(V)$	$\Phi_1(t)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-
$\Phi_3(S)$	$\Phi_4(\lambda)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-
$\Phi_3(S)$	$\Phi_1(t)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-
$\Phi_4(\lambda)$	$\Phi_1(t)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-

Для линейризации исходных регрессионных моделей различных спецификаций было произведено их нормирование методом линейного программирования, результаты которого представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Нормирование значений для построения математических моделей

№	X_0	Нормированные значения							Натуральные значения						
		Факторы				Функция			Факторы				Функция		
						Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА					Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА
$X_1(t)$	$X_2(V)$	$X_3(S)$	$X_4(\lambda)$	$Y(P_Y)$			$\Phi_1(t)$	$\Phi_2(V)$	$\Phi_3(S)$	$\Phi_4(\lambda)$	$R(P_Y)$				
для построения линейной модели															
1	1	-0,846	-0,846	-0,920	-0,951	-0,673	-0,672	-0,764	0,5	90	0,083	11	386	302	259
2	1	-0,846	-0,846	-0,920	0,778	-0,565	-0,418	-0,504	0,5	90	0,083	50	436	391	352
...															
15	1	0,692	0,692	0,753	-0,951	-0,146	-0,030	-0,238	1	180	0,256	11	631	527	447
16	1	0,692	0,692	0,753	0,778	-0,039	0,039	0,033	1	180	0,256	50	681	551	544
для построения степенной модели															
1	1	-0,764	-0,764	-0,841	-0,877	-0,376	-0,385	-0,516	0,5	90	0,083	11	386	302	259
2	1	-0,764	-0,764	-0,841	0,170	-0,357	-0,287	-0,307	0,5	90	0,083	27	392	326	307
...															
80	1	0,787	0,787	0,856	0,170	0,221	0,310	0,272	1	180	0,256	27	623	519	492
81	1	0,787	0,787	0,856	0,889	0,332	0,387	0,396	1	180	0,256	50	681	551	544
для построения показательной модели															
1	1	-0,846	-0,846	-0,920	-0,951	-0,376	-0,385	-0,516	0,5	90	0,083	11	386	302	259
2	1	-0,846	-0,846	-0,920	-0,242	-0,357	-0,287	-0,307	0,5	90	0,083	27	392	326	307
...															
80	1	0,692	0,692	0,753	-0,242	0,221	0,310	0,272	1	180	0,256	27	623	519	492
81	1	0,692	0,692	0,753	0,778	0,332	0,387	0,396	1	180	0,256	50	681	551	544

Далее были определены коэффициенты регрессии для линейризованных моделей и их статистическая значимость. Согласно данным приведенным в табл. 3.6 при установленном для каждого вида регрессионной модели уровне значимости все анализируемые факторы являются статистически значимыми, а модели - адекватными. Стоит отметить, что степень влияния случайных факторов на формирование радиальной составляющей силы резания, выражаемая соответствующим коэффициентом регрессии, у степенной и показательной моделей для всех рассматриваемых материалов находится в пределах $0,02 \div 0,3$ по абсолютной величине, что позволяет сделать вывод о незначительности влияния случайных факторов и о надежности дальнейших прогнозов радиальной составляющей силы резания при использовании данных моделей.

Таблица 3.6 – Коэффициенты регрессии

Параметр	Обрабатываемый материал								
	Сталь 20			Сталь 20ХН			Сталь 30ХМА		
	Спецификация модели								
	Линейная	Степенная	Показательная	Линейная	Степенная	Показательная	Линейная	Степенная	Показательная
Оценка влияния факторов									
Случайные факторы	-0,35	-0,02	-0,02	-0,29	0,03	0,03	-0,35	-0,02	-0,02
Глубина резания t , мм	0,37	0,29	0,29	0,34	0,27	0,25	0,33	0,24	0,24
Скорость резания V , м/мин	-0,21	-0,29	-0,29	-0,22	-0,28	-0,29	-0,20	-0,28	-0,28
Подача S , мм/об	0,41	0,36	0,38	0,44	0,40	0,40	0,42	0,37	0,38
Коэф. теплопроводности λ , Вт/мК	0,19	0,10	0,11	0,20	0,13	0,12	0,24	0,15	0,16
Оценка погрешности									
Достоверность адекватной модели, %	98,7	99,8	99,9	99,6	99,9	99,9	98,9	99,8	99,9
Табличное значение F-критерия	1,652	1,918	2,014	1,821	2,014	2,014	1,664	1,918	2,014
Расчетное значение f-критерия	1,659	1,992	4,014	2,018	4,415	3,743	1,673	1,946	3,957
Средняя относительная погрешность, %	13,53	7,49	5,21	12,09	5,95	5,88	14,10	6,53	5,47

Для оценки погрешности расчета радиальной составляющей силы резания по полученным регрессионным моделям были определены восстановленные величины функции отклика R'' и установлена статистическая погрешность математических аппаратов для каждой комбинации режимов механической обработки. Так как для всех трех рассматриваемых видов регрессионных моделей все анализируемые факторы

являются статистически значимы, следовательно, $R'=R''$. Результаты расчета восстановленных значений функции отклика приведены в таблице 3.7.

Таблица 3.7 – Результаты расчета значений функции отклика

№	Исходные данные	Линейная модель		Степенная модель		Показательная модель	
	R (P _x)	R''(P _x)	погрешность расчета, %	R''(P _x)	погрешность расчета, %	R''(P _x)	погрешность расчета, %
<i>Сталь 20</i>							
1	386	211	45,25	375	2,85	357	7,49
2	392	274	30,09	408	4,15	380	2,96
...							
80	623	714	14,62	665	6,91	631	1,21
81	681	804	18,09	706	3,68	691	1,39
<i>Сталь 20XH</i>							
1	302	191	36,77	294	2,49	295	2,41
2	326	240	26,27	328	0,51	315	3,51
...							
80	519	567	9,24	552	6,30	504	2,86
81	551	638	15,78	594	7,73	554	0,4
<i>Сталь 30ХМА</i>							
1	259	148	43,37	277	6,98	263	1,62
2	307	208	32,36	316	2,97	289	5,75
...							
80	492	531	7,86	498	1,22	464	5,63
81	544	618	13,66	545	0,21	532	2,19

Исходя из величины достоверности адекватности модели и средней относительной погрешности, в качестве математических моделей, описывающих влияние параметров обработки на величину радиальной составляющей силы резания, были выбраны математические модели следующего вида:

Для стали 20:

$$P_y = 268,46 \cdot 0,996^V \cdot 18,683^S \cdot 2,037^t \cdot 1,004^\lambda \quad (3.42)$$

Для стали 20XH:

$$P_y = 230,81 \cdot 0,996^V \cdot 20,574^S \cdot 1,814^t \cdot 1,004^\lambda \quad (3.43)$$

Для стали 30ХМА:

$$P_y = 201,58 \cdot 0,996^V \cdot 20,375^S \cdot 1,833^t \cdot 1,006^\lambda \quad (3.44)$$

Из формул (3.42)-(3.44) видно, что с увеличением скорости резания происходит уменьшение величины радиальной составляющей силы резания, а с увеличением подачи, глубины и теплопроводности инструмента - величина радиальной составляющей силы резания возрастает, что согласуется с традиционными представлениями теории резания металлов, согласно которым [52], [115], [129] сила резания:

- уменьшается с увеличением скорости резания в виду уменьшения сопротивления сдвигу в зоне стружкообразования, увеличения угла сдвига и уменьшения длины участка упрочнения и длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента;

- увеличивается с увеличением толщины срезаемого слоя в виду преобладающего влияния увеличения длины участка пластического контакта и длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента;

- увеличивается с увеличением ширины срезаемого слоя в виду увеличения суммы нормальных напряжений по длине контакта стружки с передней поверхностью инструмента;

- увеличивается с увеличением теплопроводности инструментального материала в виду увеличения сопротивления сдвигу в зоне стружкообразования, уменьшению угла сдвига и увеличению длины участка упрочнения и длины контакта стружки с передней поверхностью инструмента.

3.3. Анализ влияния упругих деформаций технологической системы на величину радиальной составляющей силы резания. Общее выражение погрешности обработки

При анализе влияния упругих деформаций элементов технологической системы на точность обработки, проведенном параграфе 3.1, было принято, что величина радиальной составляющей силы резания P_Y остается постоянной в процессе обработки, однако в действительности, вследствие неравномерности податливости системы, изменяется расстояние между режущей кромкой инструмента и осью заготовки, а, следовательно, и глубина резания, величина которой, оказывает непосредственное влияние на величину силы P_Y . Так, в начальный момент, когда произойдет полное

врезание резца, система займет начальное деформированное положение (см. рисунок 3.10, а). В дальнейшем, по ходу обработки величина деформации системы будет меняться, вследствие чего изменится и глубина резания (см. рисунок 3.10, б).

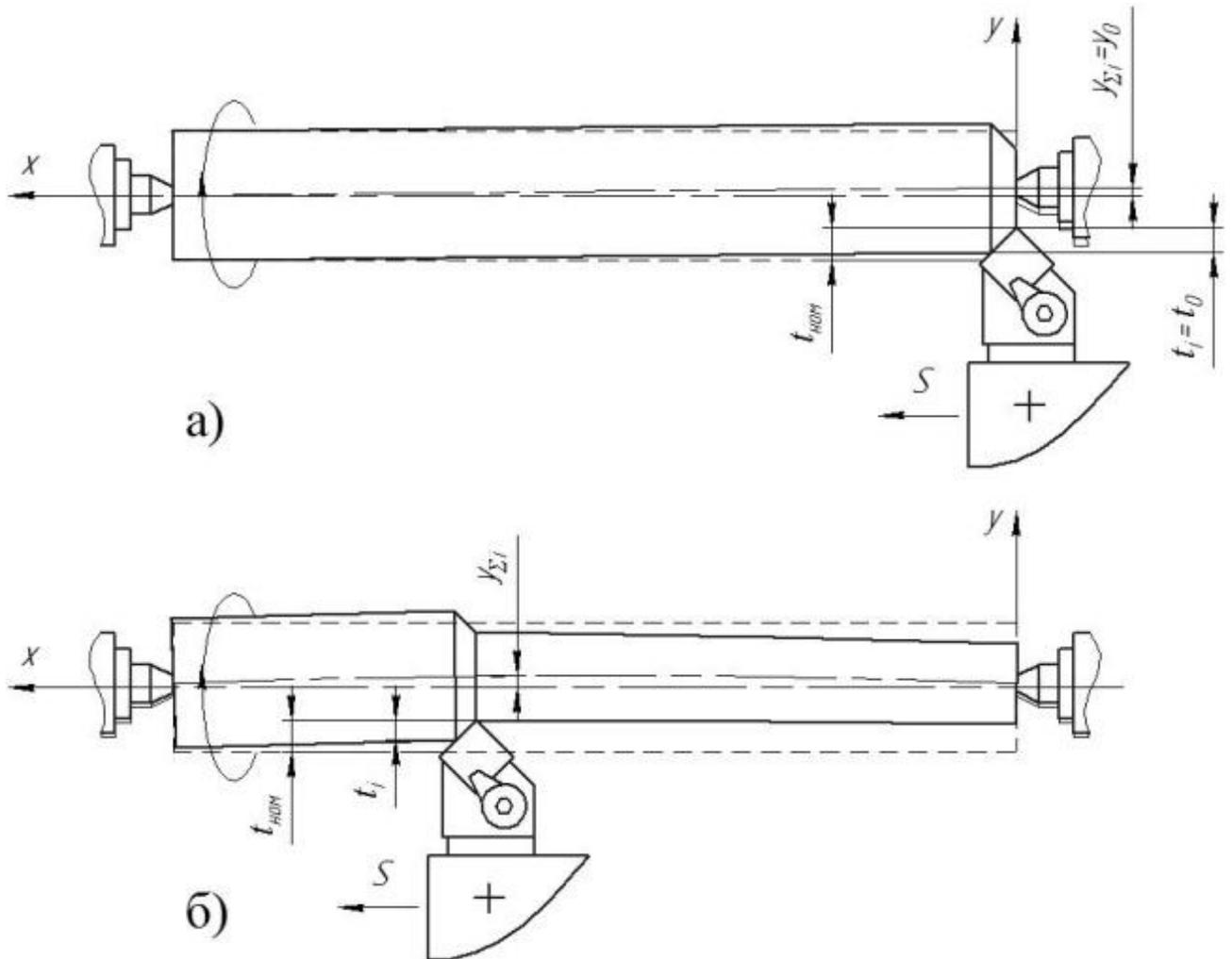


Рис. 3.10. Изменение фактической глубины резания вследствие непостоянства упругих деформаций технологической системы по ходу обработки: а) глубина резания после врезания; б) глубина резания в i -ый момент времени.

(геометрические параметры процесса резания изображены условно, на практике главный угол в плане при обработке деталей типа нежесткий вал составляет $90^\circ \div 95^\circ$)

Изменение глубины резания в зависимости от упругих деформаций системы в общем виде можно выразить:

$$t_i = t - y_i; \quad (3.45)$$

где t_i – глубина резания при рассматриваемом положении резца; t – номинальная глубина резания.

Исходя из полученных уточненных математических моделей (3.42) - (3.44) и основных положений теории резания металлов выражение для определения радиальной составляющей силы резания можно в общем виде выразить как:

$$P_Y = C_p \cdot t^{x_p} \cdot S^{y_p} \cdot V^{n_p} \cdot \lambda^{m_p} \cdot K_p; \quad (3.46)$$

где S – подача; V – скорость резания; λ - теплопроводность инструментального материала; C_p , x_p , y_p , n_p , m_p – коэффициент и показатели степени соответственно; K_p – поправочный коэффициент.

Для выявления влияния непостоянства податливости системы на величину радиальной составляющей силы резания, примем, что физико-механические характеристики материалов заготовки и инструмента, припуск на обработку и все режимные параметры обработки, кроме глубины резания, остаются неизменными в процессе обработки. Тогда справедливо выражение:

$$P_{Yi} = C \cdot (t - y_i); \quad (3.47)$$

где $C = C_p \cdot S^{y_p} \cdot V^{n_p} \cdot \lambda^{m_p} \cdot K_p = \text{const}$ – постоянная для данных условий обработки; P_{Yi} – величина радиальной составляющей резания с учетом влияния непостоянства податливости системы.

С учетом выражения (3.27), после преобразований выражение (3.47) примет следующий вид:

$$P_{Yi} = \frac{P_Y}{1 + C \cdot \varepsilon_i}; \quad (3.48)$$

где ε_i — податливость системы в рассматриваемом положении резца.

Уравнение (3.48) позволяет определить величину P_Y в любой точке по длине вала в зависимости от податливости системы.

Для оценки степени влияния данного фактора на величину погрешности обработки, для случая чистовой токарной обработки ($t=0,5$ мм) заготовки из стали 20ХН длиной 605 мм до диаметра 39 мм, твердосплавными пластинами из твердого сплава ВК6 при скорости резания $V=100$ м/мин и подаче $S=0,166$ мм/об были произведен расчет ожидаемой погрешности обработки как с учетом непостоянства радиальной составляющей силы резания, обусловленного упругими деформациями.

циями технологической системы, ($\Delta_{\Sigma 2}$) так и при условии её постоянства по ходу обработки. Результаты расчета представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8. Влияние непостоянства силы резания вследствие упругих деформаций технологической системы на точность обработки

Расстояние от задней бабки (x), мм	P_{Y0} , Н	$\Delta_{\Sigma 1}$, мм при $P_Y = P_{Y0}$	ΔP , Н	$\Delta_{\Sigma 2}$, мм (при $P_Y = P_{Y0} - \Delta P$)	$\Delta = \Delta_{\Sigma 1} - \Delta_{\Sigma 2}$, мм
10	491,96	0,0379	5,83	0,0374	0,0005
55		0,0509	7,79	0,0500	0,0009
100		0,0786	11,91	0,0764	0,0022
145		0,1122	16,79	0,1077	0,0045
190		0,1442	21,34	0,1369	0,0073
235		0,1691	24,80	0,1591	0,0100
280		0,1827	26,68	0,1711	0,0116
325		0,1830	26,72	0,1714	0,0116
370		0,1697	24,89	0,1596	0,0101
415		0,1443	21,35	0,1370	0,0073
460		0,1105	16,54	0,1061	0,0044
505		0,0739	11,22	0,0720	0,0020
550		0,0425	6,53	0,0419	0,0007
595		0,0264	4,07	0,0261	0,0003

Исходя из полученных данных, приведенных в таблице 3.8, можно сделать вывод о существенном влиянии данного фактора на величину погрешности обработки. Таким образом, с учетом выражения (3.48), формула (3.38) для расчета ожидаемой погрешности обработки $\Delta_{\Sigma i}$, вызванной упругими деформациями элементов технологической системы при токарной обработке деталей типа нежесткий вала в центрах окончательно примет вид:

$$\Delta_{\Sigma i} = \frac{2 \cdot P_Y}{I + C \cdot \varepsilon_i} \cdot \left\{ \frac{x^3 \cdot (l - x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{I}{E \cdot I_2} \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l - x) \cdot x^2 \right] + \left[\left(l - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{II} \right] + \varepsilon_C \right\}; \quad (3.49)$$

3.4. Экспериментальная проверка результатов теоретических исследований

Для оценки достоверности предложенной математической модели для расчета ожидаемой погрешности обработки была проведена серия экспериментов, по обработке группы заготовок длиной 325 мм из стали 40X (3шт.) до диаметра 23,6 мм на токарно-винторезном станке с ЧПУ модели CA500C15Ф3, результаты которой представлены в таблице 3.9 и на рисунке 3.11. Обработка производилась режущей пластиной WNMG 080408 ($\alpha=0^\circ$, $r=0,8\text{мм}$, $\varphi=95^\circ$, $\varphi_l=5^\circ$, $\gamma=-6^\circ$; $\lambda=-6^\circ$) из твердого сплава T15K6 при следующих режимах резания: подача - 0,25 мм/об, глубина резания - 0,7 мм, скорость резания - 100 м/мин. В процессе обработки при помощи динамометра было зафиксировано колебание величины силы резания в пределах 592-665 Н. Измерения полученного диаметра обработки производилось в четырнадцати сечениях с шагом 25 мм при помощи микрометра МКЦ 25-2 ГОСТ 6507-90 в соответствии с методикой приведенной в параграфе 2.4.

Таблица 3.9. Анализ сходимости результатов экспериментов с расчетными значениями, полученными по различным математическим моделям

x, мм	Экспериментальные данные							Расчетные данные			
	Номер детали						Среднее значение Δ_{Σ} , мм	по традиционной модели [60]		по уточненной модели (3.49)	
	№1		№2		№3			Δ_{Σ} , мм	Откло- нение, %	Δ_{Σ} , мм	Откло- нение, %
	$D_{\text{дет}}$, мм	Δ_{Σ} , мм	$D_{\text{дет}}$, мм	Δ_{Σ} , мм	$D_{\text{дет}}$, мм	Δ_{Σ} , мм					
320	23,658	0,058	23,64	0,040	23,649	0,049	0,049	0,019	61,45	0,058	18,74
300	23,681	0,081	23,661	0,061	23,665	0,065	0,069	0,041	40,26	0,072	5,12
275	23,72	0,120	23,696	0,096	23,711	0,111	0,109	0,098	9,98	0,114	4,56
250	23,751	0,151	23,733	0,133	23,742	0,142	0,142	0,169	18,89	0,165	16,46
225	23,795	0,195	23,777	0,177	23,789	0,189	0,187	0,238	26,60	0,214	14,37
200	23,826	0,226	23,798	0,198	23,821	0,221	0,215	0,289	34,62	0,251	16,78
175	23,843	0,243	23,818	0,218	23,829	0,229	0,230	0,318	38,51	0,272	18,27
150	23,849	0,249	23,823	0,223	23,833	0,233	0,235	0,320	36,18	0,274	16,64
125	23,835	0,235	23,808	0,208	23,82	0,220	0,221	0,294	32,94	0,256	16,10
100	23,796	0,196	23,777	0,177	23,788	0,188	0,187	0,244	30,49	0,221	17,92
75	23,757	0,157	23,731	0,131	23,753	0,153	0,147	0,179	21,77	0,169	15,32
50	23,709	0,109	23,687	0,087	23,698	0,098	0,098	0,111	13,47	0,111	13,87
25	23,682	0,082	23,656	0,056	23,669	0,069	0,069	0,057	17,09	0,061	11,44
5	23,661	0,061	23,644	0,044	23,648	0,048	0,051	0,038	25,92	0,040	21,24
Средняя относительная погрешность расчета, %								29,16	14,77		

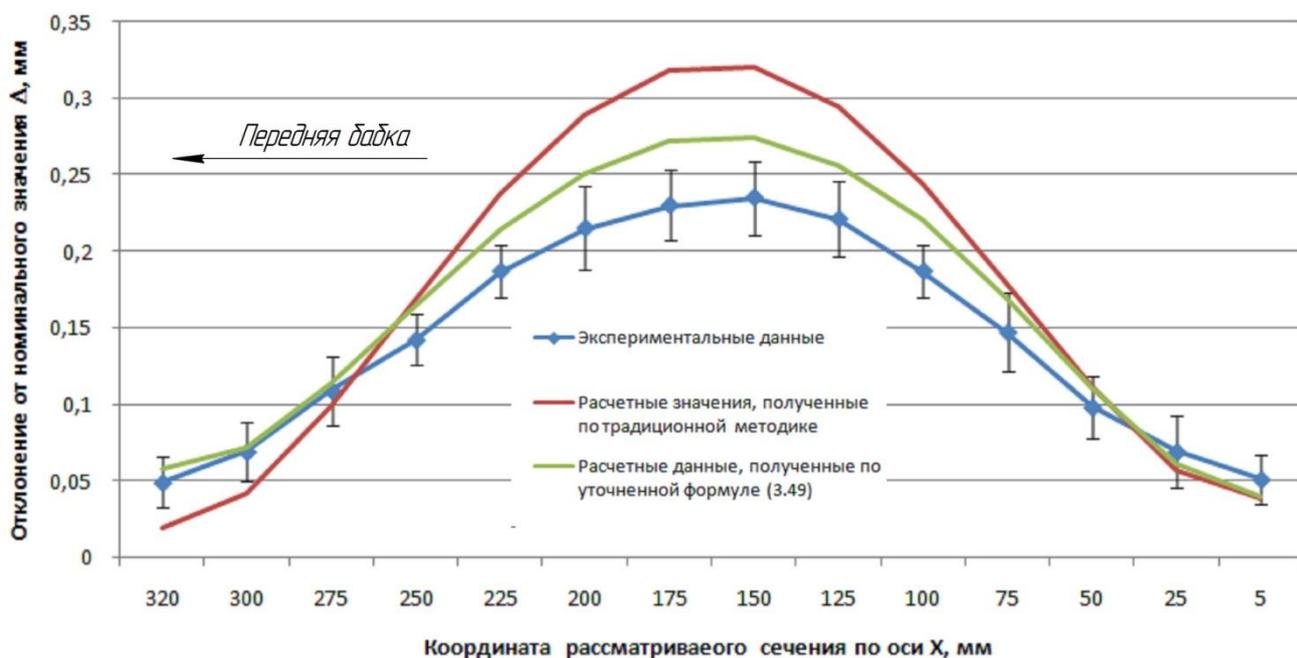


Рис. 3.11. Отклонение размеров обработанных валов от заданных значений

Анализ сходимости результатов экспериментов с расчетными значениями, полученными по различным математическим моделям показал, что средняя относительная погрешность "традиционной" методики расчета по отношению к экспериментальным данным составила 29,16%. Расчет по предлагаемой математической модели позволяет снизить среднюю относительную погрешность до 14,77%, т.е. практически в 2 раза. Таким образом, предложенная модель расчета при точении конструкционных легированных сталей является адекватной, что позволяет применять ее в алгоритмах функционирования систем автоматического управления.

Выводы по главе 3

Анализ погрешности обработки, вызванной упругими деформациями и отжатиями элементов технологической системы, показал, что существенное влияние на точность обработки оказывают: изгиб оси вала, смещение линии центров и отжатие суппорта, вызванные действием радиальной составляющей силы P_r . При этом существующие математические модели для определения погрешности обработки не недостаточно полно отражают поведение нежесткой заготовки в процессе обработки и носят упрощенный характер. Так, существующие методики расчета не учитывают тот

факт, что с момента начала обработки гладкий вал становится двухступенчатым с непрерывно изменяющимся соотношением длин ступеней, вследствие чего постоянно изменяется суммарный момент инерции вала, а, следовательно, и податливости детали, что весьма существенно при обработке длинномерных тонких деталей. Кроме того в существующих методиках принято, что величина радиальной составляющей силы резания P_r остается постоянной в процессе обработки, однако, в действительности, вследствие неравномерности податливости системы, изменяется расстояние между режущей кромкой инструмента и осью заготовки, а, следовательно, и глубина резания, величина которой, оказывает непосредственное влияние на величину силы P_r . Применение разработанной уточненной математической модели для расчета ожидаемой при токарной обработке деталей типа нежесткий вал погрешности обработки позволяет снизить среднюю относительную погрешность расчета практически в 2 раза, что подтверждено экспериментально.

Анализ традиционных расчетно-аналитических методик определения радиальной составляющей силы резания в зависимости от режимов резания показал, что математические зависимости, положенные в их основу, допускают большой процент ошибки, в виду некорректного учета или отсутствия учета множества факторов, влияющий на процесс резания (в частности, теплопроводности инструментального и обрабатываемого материалов) и их использование в автоматизированных способах расчета параметра регулирования, а также построение на их основе математических моделей управления автоматическими системами не обеспечивает надёжности выполняемого процесса резания. Исходя из выявленных недостатков существующих методика расчета, были разработаны уточненные статистические математические модели для ряда сталей ферритного класса (20, 20ХН, 30ХМА), учитывающие теплофизические свойства контактной пары, полностью согласующиеся с традиционными представлениями теории резания, применение которых позволит повысить эффективность алгоритмов управления процессом токарной обработки.

Глава 4. Автоматическое управление точностью продольного профиля нежестких валов при токарной обработке

В данной главе осуществлена постановка технологической задачи, решение которой позволит обеспечивать требуемую точность формы и диаметральных размеров обработанных деталей как непосредственно после обработки, так и с течением времени. Предложен принцип управления, обеспечивающий решение поставленной технологической задачи, а также структурная и функциональные схемы и алгоритм управления системы автоматического управления, основанной на предложенном принципе управления. Представлена практическая реализация разработанной системы автоматического управления.

4.1. Постановка технологической задачи

Важнейшим этапом при разработке системы автоматического управления является постановка технологической задачи. Для корректной постановки технологической задачи необходимо установить причину, препятствующую достижению требуемого уровня выходного параметра обработки. В рамках данного исследования выходным параметром является точность формы и диаметральных размеров обработанных деталей. Согласно анализу, приведенному в главе 1, основным препятствием для достижения требуемой точности обработки является непостоянство расстояния между режущей кромкой и осью детали по ходу обработки в виду значительных упругих деформаций элементов технологической системы. Однако, даже при достижении требуемой точности в виду непостоянства условий обработки, в частности припуска на обработку и физико-механических свойств, в детали формируются неравномерные остаточные напряжения, релаксация которых со временем приводит к потере точности формы обработанной детали. При этом, основным фактором, влияющим на их формирование, является непостоянство силы резания, что обуславливает необходимость её стабилизации как в течении одного оборота детали, так и по всей длине обработки [97]. Таким образом, на основании вышеизложенного в качестве технологической задачи, для решения которой будет проектироваться система автоматического управления, выбрана задача обеспече-

ния постоянства расстояния между режущей кромкой инструмента и осью обрабатываемой детали при одновременной силовой стабилизации процесса резания.

4.2. Анализ физических принципов управления точностью токарной обработки и выбор законов управления.

В главе 3 при анализе влияния упругих деформаций элементов технологической системы под действием силы резания на точность обработки было принято допущение, что физико-механические и теплофизические характеристики материалов заготовки и инструмента остаются неизменными как по всему объему материала, так и являются постоянными для всей партии обрабатываемых заготовок и используемого инструмента, а припуск на обработку остаются неизменными по ходу обработки, что не соответствует действительности. Так, например, ГОСТ 4543-2016, допускает достаточно широкий разброс процентного содержания различных химических элементов в стали, что в свою очередь приводит к существенному разбросу его механических свойств. В частности, колебание физико-механических свойств материала в зависимости от содержания углерода и легирующих элементов может достигать 20% для углеродистых и низколегированных сталей, и превышать 40% для высоколегированных сталей [39]. Кроме того, существенное влияние на физико-механические и теплофизические свойства оказывает и технологические режимы термической обработки, влияющие на микро- и макро- структуру металла. Аналогичным образом, для каждой марки твердого сплава физико-механические и теплофизические свойства материала изменяются в зависимости от фактической растворимости карбидов металлов в кобальтовой связке в процессе спекания [74]. Колебание припуска, в свою очередь, зависит от качества выполнения предыдущего этапа обработки. Изменение любого из этих параметров влечет за собой соответствующее изменение радиальной составляющей силы резания на величину ΔP_Y . С учетом вышесказанного, выражение (3.49) может быть записана в следующем виде:

$$\Delta_{\Sigma i} = 2 \cdot \left(\frac{P_Y}{I + C \cdot \varepsilon_i} + \Delta P_Y \right) \cdot \left\{ \frac{x^3 \cdot (l-x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{I}{E \cdot I_2} \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l-x) \cdot x^2 \right] + \left[\left(I - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{II} \right] + \varepsilon_C \right\}; \quad (4.1)$$

Для удобства анализа, выражение (4.1) запишем в виде:

$$\Delta_{\Sigma_i} = 2 \cdot (P_Y(\varepsilon_i) \cdot \varepsilon_i + \Delta P_Y \cdot \varepsilon_i). \quad (4.2)$$

где $P_Y(\varepsilon_i) \cdot \varepsilon_i$ - отжатие технологической системы при постоянном припуске и свойствах обрабатываемого и инструментального материалов, $\Delta P_Y \cdot \varepsilon_i$ - отжатие технологической системы, обусловленное непостоянством припуска и колебанием свойств обрабатываемого и инструментального материалов.

Исходя из выражения (4.2) можно предложить как минимум три способа обеспечения требуемой точности процесса токарной обработки, реализовать которые можно путем применения систем автоматического управления [69]:

1. Исходя из величины допустимой погрешности обработки, поддерживать постоянным значение радиальной составляющей силы резания P_Y , при котором максимальная деформация технологической системы u_i не будет превышать половины значения величины допустимой погрешности обработки. Корректировку величины радиальной составляющей силы резания можно осуществлять путем регулирования режимных параметров в процессе обработки. Анализ полученной уточненной математической модели процесса формирования радиальной составляющей силы резания, приведенной в параграфе 3.2, показал целесообразность использования в качестве параметра управления значения подачи S , ввиду его наибольшего влияния на величину составляющей силы резания. Однако, при реализации данного метода обработка ведется с минимальной подачей s_{\min} , что приводит к уменьшению производительности процесса резания, а как следствие увеличению себестоимости. Кроме того, в связи с тем, что упругие отжатия элементов системы u_i изменяются по длине обработки, диаметр обработанной детали окажется переменным по длине и возникает погрешность формы готового изделия - бочкообразность (рис. 4.1, а).

2. Исходя из величины податливости системы ε_i в конкретном сечении, производить корректировку величины силы P_Y , путем регулирования режимных параметров в процессе резания, обеспечивая постоянным значение их произведения и не превышающим значения половины величины допустимой погрешности. Однако для реализации данного метода необходимо производить корректировку режимных па-

раметров в достаточно широком диапазоне, что не всегда реализуемо на практике. Кроме того, при реализации данного метода происходит копирование погрешности формы исходной заготовки в виде одноименной погрешности меньшей величины, а также появление неравномерных остаточных напряжений в поверхностном слое, приводящих к последующему искривлению оси детали (рис. 4.1, б).

3. Исходя из величины податливости системы ε_i , управлять траекторией движения режущего инструмента путем смещения его в радиальном направлении на величину отжатия элементов системы, тем самым обеспечивая постоянство произведения $P_y(\varepsilon_i) \cdot \varepsilon_i$ по ходу обработки. Параллельно с этим обеспечить силовую стабилизацию процесса резания, например, за счет регулирования величины подачи s , для обеспечения постоянства произведения $\Delta P_y \cdot \varepsilon_i$. Исходя из вышесказанного, на основании выражения (3.39), в качестве математической модели для определения траектории движения режущего инструмента, обеспечивающей компенсацию влияния погрешностей, возникающих вследствие упругих деформаций элементов технологической системы в процессе токарной обработки нежесткого вала, обрабатываемого в опорах может использоваться следующая зависимость:

$$z_i = R - y_{\Sigma i} = R - \frac{P_y}{I + C \cdot \varepsilon_i} \cdot \left\{ \frac{x^3 \cdot (l - x)^2}{3 \cdot E \cdot I_1 \cdot l^2} + \frac{I}{E \cdot I_2} \left[\left(\frac{l^3 - x^3}{3} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right)^2 - (l^2 - x^2) \cdot \frac{x^2}{l} + (l - x) \cdot x^2 \right] + \right. \\ \left. + \left[\left(l - \frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_3 + \left(\frac{x}{l} \right)^2 \cdot \varepsilon_{II} \right] + \varepsilon_C \right\}; \quad (4.3)$$

где z_i - координата поперечного положения инструмента в i -ый момент времени; R - радиус обработанной детали.

Таким образом, формирование траектории движения режущего инструмента происходит с учетом деформации упругих элементов системы технологической системы (рис. 4.1, в).

Данный метод является наиболее перспективным, так как позволяет производить обработку на рациональных режимах, обеспечивает получение минимальной погрешности формы и диаметральных размеров детали при обработке, а также получение равномерных остаточных напряжений в детали, что позволит обеспечить сохранение достигнутой точности во времени.

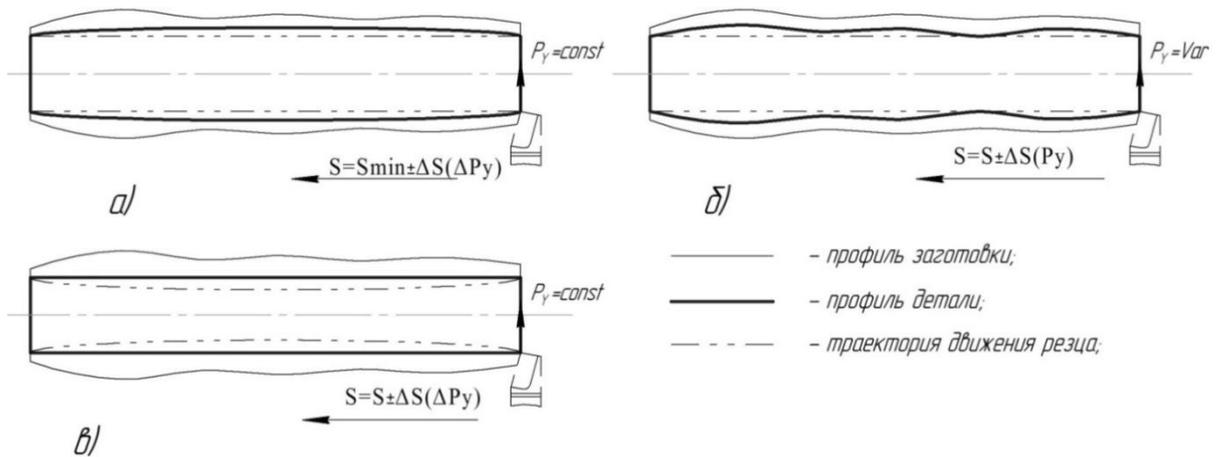


Рис. 4.1. Геометрическая форма детали при различных методах управления

Для проверки применимости предложенного способа обеспечения требуемой точности в условиях полустативного и чистового точения, рассмотрим подробнее процесс силовой стабилизации обработки. На рисунке 4.2 показана схема для разработки алгоритма управления процессом обработки.

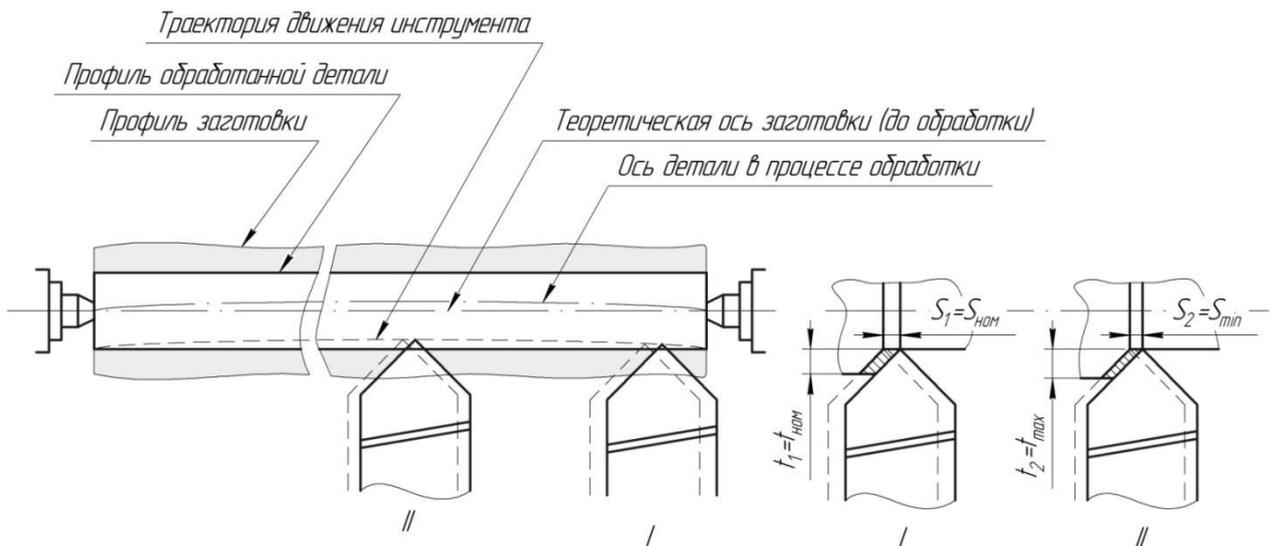


Рис. 4.2. Схема управления процессом механической обработки

(геометрические параметры процесса резания изображены условно, на практике главный угол в плане при обработке деталей типа нежесткий вал составляет $90^\circ \div 95^\circ$)

Исходя из схемы видно, что изменение припуска в значительной степени вызывает изменение ширины срезаемого слоя. Для обеспечения постоянства площади поперечного сечения снимаемой стружки, позволяющего обеспечить постоянство силы резания по ходу обработки, необходимо изменять в противоположную сторону тол-

щину срезаемого слоя. Этого можно достичь управляя подачей. В момент I глубина резания $t_{ном}$ соответствует номинальному значению и обработка ведется с номинальной подачей $S_{ном}$. При увеличении глубины резания до значения t_{max} за счет неконтролируемого изменения припуска в момент II, для поддержания постоянной площади поперечного сечения срезаемого слоя, величину подачи необходимо уменьшить с величины $S_{ном}$ до S_{min} , соответственно, уменьшая толщину срезаемого слоя.

Используя выражения (3.42) - (3.44), составим таблицу 4.1 необходимого изменения величины подачи в зависимости от изменения глубины резания в виду непостоянства припуска, с целью сохранения постоянства радиальной составляющей силы резания по ходу обработки для точения исследуемых сталей при скорости резания 180 м/мин режущей пластиной WNMG 080408 из твердого сплава T15K6. При этом, как отмечалось ранее, колебание припуска, определяется результатами предыдущего этапа обработки и, для условий чистовой обработки, не должно превышать 0,2 мм, а при получистовой - 0,4 мм, в диаметральном выражении.

Таблица 4.1 – Расчет необходимого изменения подачи для обеспечения постоянства силы резания

Припуск, мм			Подача, мм/об			Сила резания, Н	Изменение подачи, мм/об
$t_{ном}$	t_{min}	t_{max}	$S_{ном}$	S_{max}	S_{min}		
для стали 20							
0,5	0,4	0,6	0,16	0,184	0,136	356	0,024
1	0,8	1,2	0,25	0,298	0,202	661	0,048
для стали 20ХН							
0,5	0,4	0,6	0,16	0,180	0,140	273	0,020
1	0,8	1,2	0,25	0,289	0,211	483	0,039
для стали 30ХМА							
0,5	0,4	0,6	0,16	0,181	0,139	253	0,021
1	0,8	1,2	0,25	0,290	0,210	448	0,040

Из результатов расчётов видно, что для компенсации колебаний припуска требуется изменение величины подачи, не превышающее величины рабочей подачи на один оборот заготовки, а необходимые режимы - соответствуют диапазону рекомендованных для данного типа обработки, что подтверждает применимость предложенного метода управления.

4.3. Структурная и функциональные схемы и алгоритм функционирования системы автоматического управления

Исходя из предложенного способа управления была разработана САУ процессом чистовой и получистовой токарной обработкой нежестких валов с повышенными требованиями к точности обработанных поверхностей, структурная схема которого представлена на рисунке 4.3.

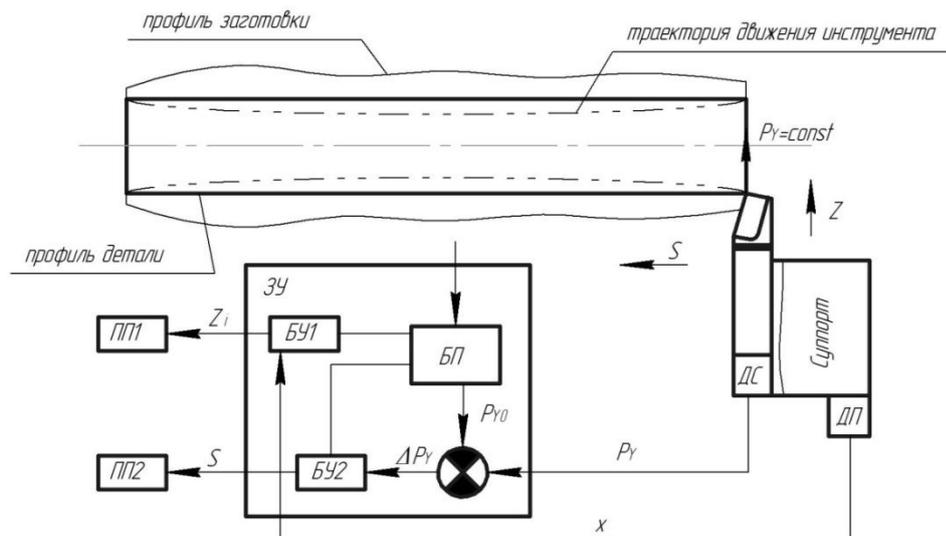


Рис. 4.3. Структурная схема системы адаптивного управления

Данная система является двухконтурной. Первый контур направлен на снижение влияния непостоянства податливости элементов технологической системы на точность обработки за счет управления траекторией движения режущего инструмента и состоит из: датчика перемещений ДП, блока формирования управляющего сигнала БУ1, блока памяти БП, привода поперечной подачи ПП1. Второй контур предназначен для снижения влияния случайных возмущающих воздействий за счет силовой стабилизации процесса резания и состоит из: датчика силы ДС, устройства сравнения, блока памяти БП, блока формирования управляющего сигнала БУ2, привода продольной подачи ПП2. Функциональные схемы контуров управления представлены на рисунке 4.4, алгоритм функционирования данной системы представлен на рисунке 4.5.

При работе первого контура управления, в процессе обработки данные о продольном положении режущего инструмента с датчика перемещений ДП передаются в блок

формирования управляющего сигнала БУ1, где, в соответствии с заложенным в блоке памяти БП математическим аппаратом, определяется величина отжатия элементов технологической системы в данном положении инструмента и формируется управляющий сигнал Z_i , который подается на привод поперечной подачи ПП1. В результате этого режущий инструмент смещается в радиальном направлении, компенсируя тем самым изменение глубины резания, вызванное отжатием элементов системы. За счет этого стабилизируется расстояние между режущей кромкой инструмента и осью детали, а также, в значительной степени, сила резания.

При работе второго контура управления, в процессе обработки резец воспринимает и передает усилие, равное величине радиальной составляющей P_Y , на датчик силы ДС. Электрический сигнал о величине P_Y поступает из датчика силы в устройство сравнения задающего устройства ЗУ. Также, на устройство сравнения из блока памяти БП поступает сигнал соответствующий номинальному значению радиальной составляющей силы резания P_{Y0} , в результате чего вырабатывается сигнал рассогласования, характеризующий изменение силы ΔP_Y , который с учетом знака передается в блок формирования управляющего сигнала БУ2. Исходя из сигнала рассогласования в блоке управления по известным формулам происходит перерасчет величины продольной подачи s и на привод продольной подачи ПП2 поступает соответствующий управляющий сигнал.

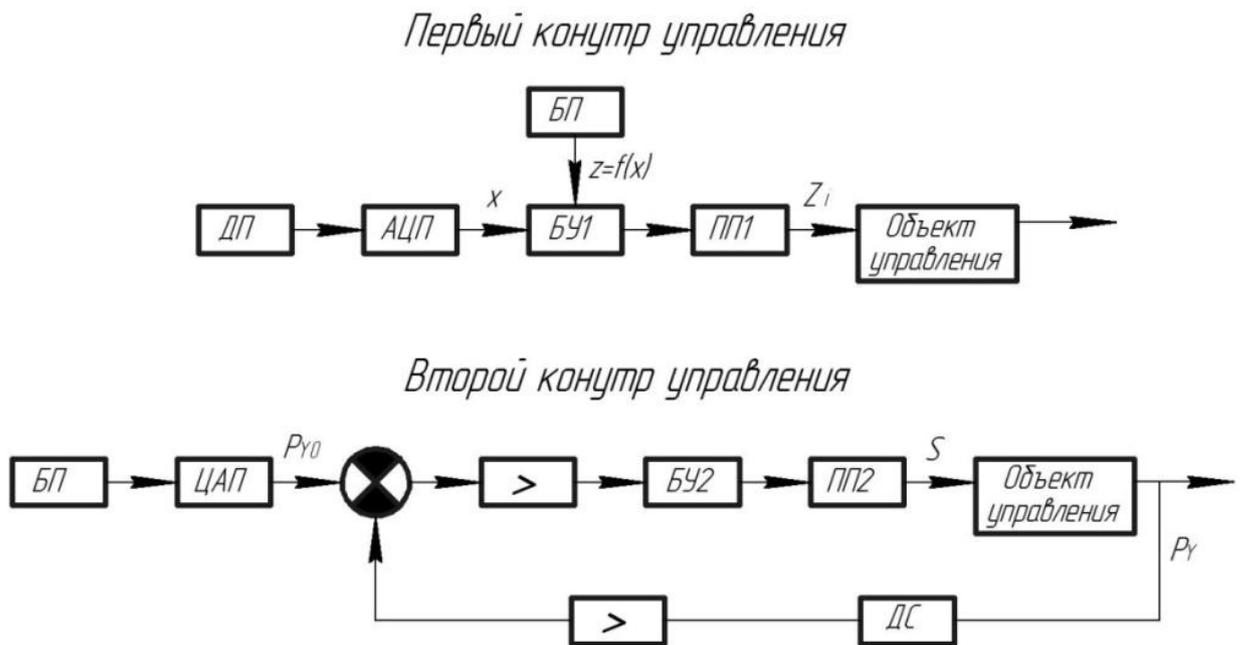


Рис. 4.4. Функциональные схемы контуров управления

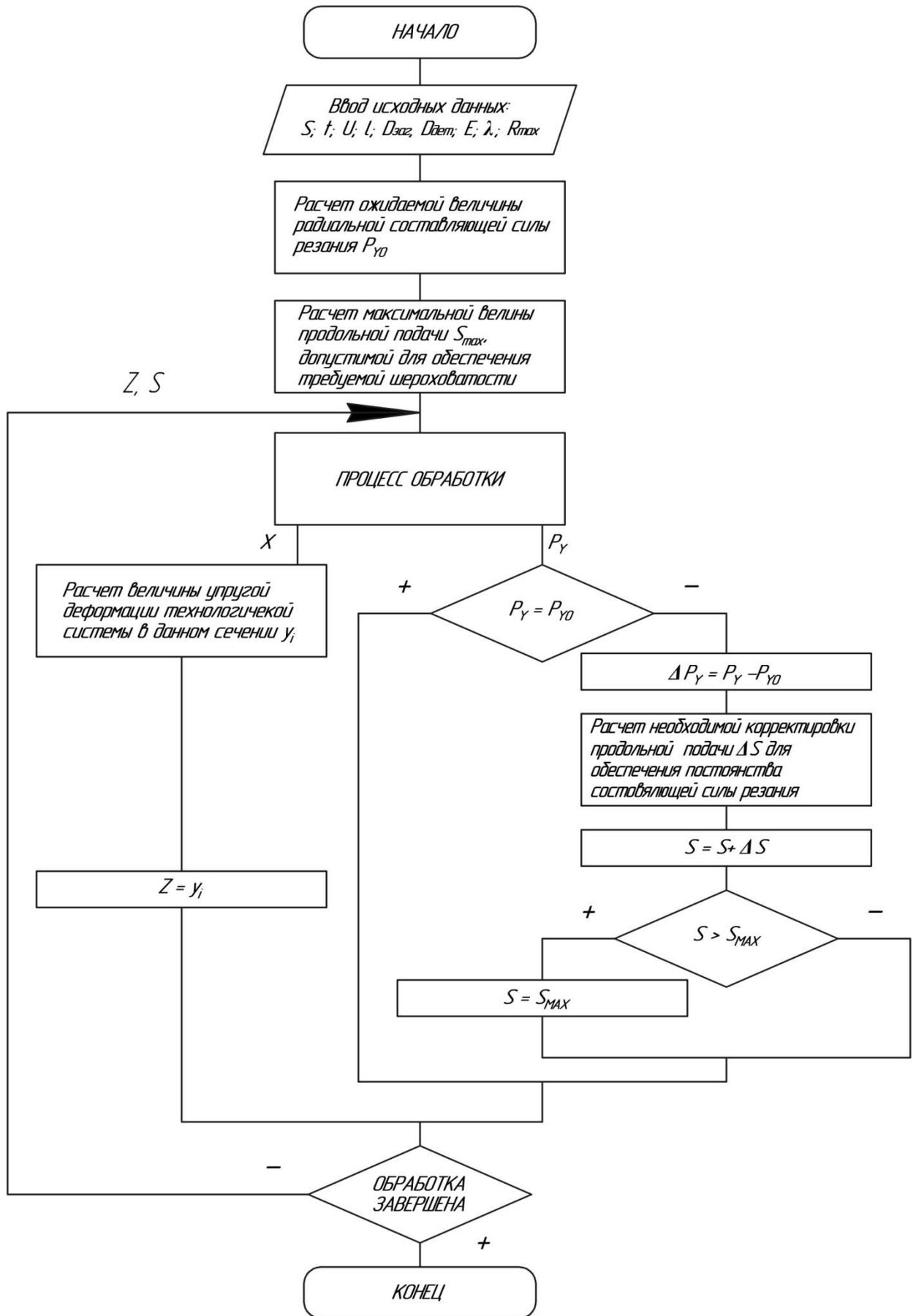


Рис. 4.5. Блок-схема алгоритма функционирования системы управления

Стоит отметить, что за счет совместного применения двух контуров управления достигается синергетический эффект, который заключается в значительном снижении колебания величины радиальной составляющей силы резания за счет стабилизации глубины резания при работе первого контура управления и повышения размерной точности обработки за счет снижения влияния неконтролируемых возмущающих воздействий при работе второго контура управления. Таким образом, при работе первого контура управления значительно снижается диапазон необходимого регулирования подачи при работе второго контура управления, что позволяет производить обработку на рациональных режимах, а работа второго контура управления в значительной мере снижает неравномерность упругих деформаций технологической системы вследствие влияния неконтролируемых возмущающих воздействий, повышая тем самым эффективность работы первого контура управления.

4.4. Реализация разработанной системы автоматического управления

Для реализации **первого контура** управления в среде Microsoft Visual Studio при помощи объектно-ориентированного языка программирования C # (C Sharp) был разработан специальный программный комплекс "Non-rigid shaft". Основные диалоговые окна (модули) и последовательность работы программного комплекса представлены на рисунке 4.6.

Программный комплекс включает в себя пять основных диалоговых окон, алгоритм взаимодействия которых выглядит следующим образом:

На начальном этапе работы с программным комплексом в диалоговом окне "схема обработки" осуществляется выбор схемы базирования. Исходя из выбранной схемы осуществляется выбор исходного шаблона G-кода, заполнение которого осуществляется на последующих этапах.

На втором этапе в диалоговом окне "параметры детали" осуществляется ввод исходных данных: марка материала и геометрические параметры заготовки и готовой детали. Выбор марки материала осуществляется из ниспадающего списка.

В соответствии с выбором, из базы данных загружаются данные о величине модуля упругости материала. Величина модуля упругости материал, в случае если она отличается от справочного значения, например если была приведена термообработка, может быть введена пользователем вручную.

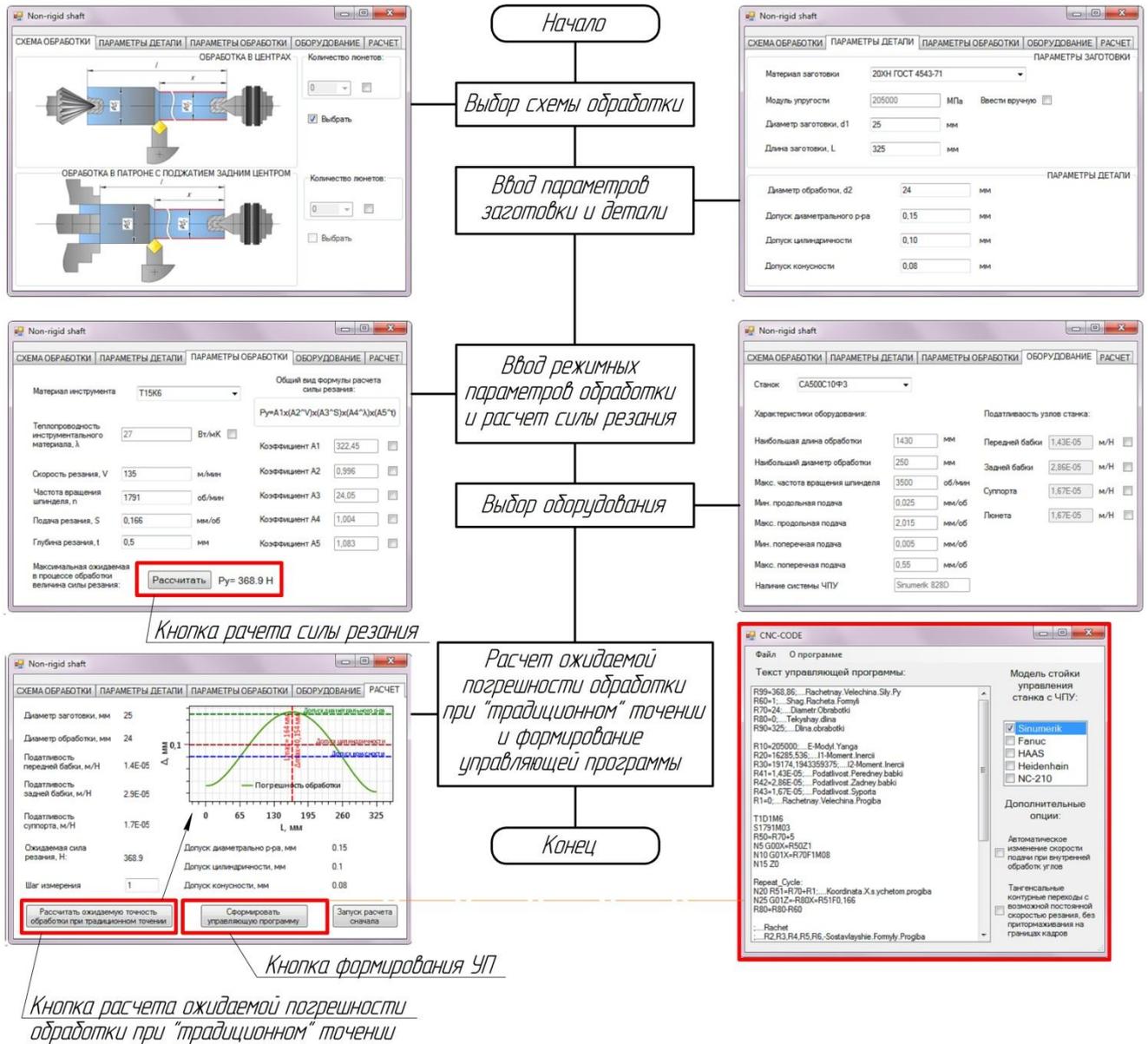


Рис. 4.6. Схема основных функциональных возможностей программного комплекса "Non-rigid shaft" и основные экранные меню

На третьем этапе в диалоговом окне "параметры обработки" осуществляется выбор марки материала режущего инструмента и соответствующих режимов обработки. Выбор марки материала режущего материала также осуществляется из нис-

падающего списка, в соответствии с чем, из базы данных загружаются данные о значении теплопроводности выбранного материала. В случае если материал режущей части не представлен в ниспадающем списке, пользователь имеет возможность ввести данные о его теплопроводности вручную. В соответствии с выбранным материалом пользователь устанавливает значения режимных параметров процесса обработки. Также, в данном окне по математическим моделям, приведенным в параграфе 3.2, производится расчет ожидаемой величины радиальной составляющей силы резания в процессе обработки. Вид математической зависимости и значения коэффициентов в ней предопределяются выбором марка материала на предыдущем этапе.

На четвертом этапе в диалоговом окне "оборудование" из ниспадающего списка осуществляется выбор оборудования для выполнения данной операции. В соответствии с выбором из базы данных загружаются и выводятся на экран основные технические характеристики оборудования, наименование и модель системы ЧПУ, а также данные о податливости элементов оборудования. На основании технических характеристик проводится проверка возможности осуществления операции на данном оборудовании. В случае если оборудование не позволяет производить обработку на указанных режимах, программный комплекс предлагает изменить режимы или выбрать другое оборудование. В случае если величина податливости элементов станка, в виду их физического износа или проведения модернизации, отличается от паспортного значения, пользователь может ввести актуальные данные вручную. При наличии соответствующих прав, введенные данные заменят существующие в базе данных.

На пятом этапе в диалоговом окне "расчет" осуществляются основные расчеты, визуализируются данные об ожидаемой точности обработки, а также окончательно формируется текст управляющей программы. В правой части диалогового окна для проверки выводятся все данные, необходимые для расчета ожидаемой погрешности обработки. При нажатии кнопки "Рассчитать ожидаемую точность при традиционном точении" происходит подключение к графическому редактору и на экран в виде графика выводится ожидаемое отклонение формы нежесткого вала в контрольных точках с соответствующим шагом по всей длине обработки. Шаг для определения

контрольных точек задается пользователем вручную, в зависимости от требуемой точности построения. Также для удобства анализа полученных данных на графике отображаются: значение максимальной погрешности обработки и координата сечения её расположения, линии ограничивающие допустимое значение отклонения диаметрального размера и отклонение профиля поверхности от цилиндричности.

При нажатии кнопки "Сформировать управляющую программу" в отдельном окне на основе разработанного шаблона G-кода происходит формирование текста управляющей программы для соответствующей системы ЧПУ станка с учетом необходимой коррекции траектории движения режущего инструмента для обеспечения требуемой точности обработки. Для улучшения результатов обработки в зависимости от выбранной системы ЧПУ, нажатием соответствующей кнопки, в текст управляющей программы пользователем могут быть включены дополнительные команды.

Таким образом, разработанный программный комплекс позволяет:

- осуществлять расчёт ожидаемой при "традиционной" обработке максимальной величины радиальной составляющей силы резания, а также определять ожидаемую погрешность обработки в каждом из сечений в зависимости от режимных параметров процесса резания;

- автоматически формировать текст управляющей программы в G-кодах для станков с ЧПУ, учитывающей необходимое поперечное смещение резца по ходу обработки для обеспечения требуемой точности обработки.

Реализация **второго контура** управления возможна за счет совместного применения встраиваемого тензометрического или пьезоэлектрического датчика силы с беспроводной передачей данных, настроенного на измерение радиальной составляющей силы резания, и возможностей программируемого логического контроллера (PLC) двигателя продольной подачи с бесступенчатым регулированием.

PLC представляет собой микропроцессорное устройство, с помощью которого осуществляется преобразование, обработка и хранение информации. Однако, современные PLC за счет высоких вычислительных мощностей и широкого набора логических и математических операций, наличия аналоговых входов для подключения различных датчиков позволяют реализовывать на их основе помимо основных

функций и различные дополнительные, связанные с возможностью адаптивного управления процессом обработки, в частности, осуществлять выработку управляющих или регулирующих воздействий на механизм, в зависимости от данных получаемых с различных датчиков. Примером реализации таких функций PLC является продукт OMATIVE ASM, разработки компании Siemens, для оптимизации подачи в режиме реального времени. ASM может использоваться для различных операций резания в следующих режимах: контроля подачи, контроля и записи результатов. Так, в режиме контроля подачи ASM непрерывно измеряет актуальную нагрузку на шпиндель и вычисляет оптимальную подачу для каждого отдельного инструмента и материала. При этом подача регулируется автоматически в режиме реального времени исходя из максимально возможного значения. Кроме этого, существует возможность задания и других критериев оптимизации [99, 149]. Подавляющее большинство современных станков с ЧПУ в базовой комплектации уже имеют бесступенчато регулируемый привод подачи с PLC управлением. Что касается систем измерения, то в большинстве своем оборудование с ЧПУ в базовой комплектации оснащается лишь системой косвенного измерения тангенциальной составляющей силы резания через ток двигателя. Данный способ измерения характеризуется большой инерционностью и крайне низкой точностью и чувствительностью, и подходит только для качественной оценки стабильности процесса обработки, но не подходит для её количественной оценки. Таким образом, данный метод измерения не отвечает поставленным задачам, и необходимость в установке датчика силы резания остается актуальной.

Так как стабилизацию радиальной составляющей силы резания планируется осуществлять за счет регулирования величины подачи, величина которой в свою очередь оказывает непосредственное влияние на шероховатость обработанной поверхности, то для реализации алгоритма функционирования второго контура системы управления помимо выявления математической взаимосвязи между параметром управления и параметром регулирования, существует необходимость разработки ограничения по допустимому диапазону регулирования подачи, позволяющему обеспечить стабильное получение в процессе обработки шероховатости в рамках одного класса как в пределах одной детали, так и при обработки партии деталей.

4.5. Разработка ограничений по допустимой величине подачи исходя из требований предъявляемых к шероховатости обработанной поверхности

Построение математической модели формирования шероховатости обработанной поверхности выполнялось для чистового точения при постоянной глубине резания $t = 0,5$ мм на токарном станке модели 1М63 без СОЖ для стальных образцов марок: 20, 20ХН, 30ХМА [7]. Исследования проводились в соответствии мультипликативной моделью полнофакторного эксперимента 3^3 (см. таблицу 4.2). В качестве характеристики функции отклика, характеризующей шероховатость обработанной поверхности, было выбрано среднее арифметическое отклонение профиля Ra . В качестве факторов, определяющих значение функции отклика, были выбраны: скорость резания V (90, 135, 180 м/мин), подача S (0,083; 0,166; 0,256 мм/об) и теплопроводность инструментального материала λ (11, 27, 50 Вт/мК). Измерение параметров шероховатости обработанной поверхности выполнялось на образцах, полученных при проведении исследований силовых характеристик процесса обработки, при помощи профилографа-профилометра «Абрис-ПМ7», технические характеристики и технологические возможности которого описаны в параграфе 2.5.

Таблица 4.2 – Матрица планирования экспериментов и результаты опытов

№ опыта	Фактические результаты опыта						Нормированные значения		
	$\Phi_1 (V)$	$\Phi_2 (S)$	$\Phi_3 (\lambda)$	$R(Ra)$			Z_1	Z_2	Z_3
				Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА			
1	90	0,083	11	2,3	2,4	2,5	-1	-1	-1
2	90	0,083	27	2,5	2,5	2,7	-1	-1	0
...									
26	180	0,256	27	3,0	2,9	2,8	1	1	0
27	180	0,256	50	3,2	3,7	3,2	1	1	1

Статистическая обработка экспериментальных данных и регрессионный анализ проводились в соответствии с методикой описанной в параграфе 2.6. На основании расчетов коэффициентов парной корреляции, было установлено, что вы-

бренные факторы являются попарно независимыми и каждый из них оказывает влияние на величину функции отклика (см. табл.4.3).

Таблица 4.3 – Расчетные значения коэффициентов парной корреляции

Сравниваемые величины		Значение коэффициента парной корреляции			Существование линейной зависимости	Характер линейной зависимости
		Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА		
$\Phi_1 (V)$	$R(Ra)$	-0,1257	-0,3378	-0,2279	вероятно	убывающая
$\Phi_2 (S)$	$R(Ra)$	0,4469	0,2195	0,1755	вероятно	возрастающая
$\Phi_3 (\lambda)$	$R(Ra)$	0,8223	0,8415	0,8637	вероятно	возрастающая
$\Phi_1 (V)$	$\Phi_2 (S)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-
$\Phi_1 (V)$	$\Phi_3 (\lambda)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-
$\Phi_2 (S)$	$\Phi_3 (\lambda)$	0,0000	0,0000	0,0000	не существует	-

Для линеаризации исходных регрессионных моделей различных спецификаций было произведено их нормирование методом линейного программирования, результаты которого представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.4 – Нормирование значений для построения математических моделей

№	X_0	Нормированные значения						Натуральные значения					
		Факторы			Функция			Факторы			Функция		
					Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА				Сталь 20	Сталь 20ХН	Сталь 30ХМА
$X_1(V)$	$X_2(S)$	$X_3(\lambda)$	$Y(Ra)$			$\Phi_1 (V)$	$\Phi_2 (S)$	$\Phi_3 (\lambda)$	$R(Ra)$				
для построения линейной модели													
1	1	-0,846	-0,920	-0,951	-0,454	-0,532	-0,222	90	0,083	11	2,3	2,4	2,5
2	1	-0,846	-0,920	0,778	0,312	0,385	0,468	90	0,083	50	3,0	3,4	3,2
...													
7	1	0,692	0,753	-0,951	-0,126	-0,440	-0,123	90	0,256	11	2,6	2,5	2,6
8	1	0,692	0,753	0,778	0,530	0,661	0,468	90	0,256	50	3,2	3,7	3,2
для построения степенной модели													
1	1	-0,764	-0,841	-0,877	-0,301	-0,377	-0,029	90	0,083	11	2,3	2,4	2,5
2	1	-0,764	-0,841	0,170	-0,063	-0,271	0,167	90	0,083	27	2,5	2,5	2,7
...													
26	1	0,787	0,856	0,170	0,457	0,116	0,260	90	0,256	27	3,0	2,9	2,8
27	1	0,787	0,856	0,889	0,641	0,752	0,602	90	0,256	50	3,2	3,7	3,2
для построения показательной модели													
1	1	-0,846	-0,920	-0,951	-0,301	-0,377	-0,029	90	0,083	11	2,3	2,4	2,5
2	1	-0,846	-0,920	-0,242	-0,063	-0,271	0,167	90	0,083	27	2,5	2,5	2,7
...													
26	1	0,692	0,753	-0,242	0,457	0,116	0,260	90	0,256	27	3,0	2,9	2,8
27	1	0,692	0,753	0,778	0,641	0,752	0,602	90	0,256	50	3,2	3,7	3,2

Далее были определены коэффициенты регрессии для линеаризованных моделей и их статистическая значимость. Согласно данным приведенным в табл. 4.5 при установленном для каждого вида регрессионной модели уровне значимости все анализируемые факторы являются статистически значимыми, а модели - адекватными.

Таблица 4.5 – Коэффициенты регрессии

Параметр	Обрабатываемый материал								
	Сталь 20			Сталь 20ХН			Сталь 30ХМА		
	Спецификация модели								
	Линейная	Степенная	Показательная	Линейная	Степенная	Показательная	Линейная	Степенная	Показательная
Оценка влияния факторов									
Случайные факторы	-0,04	0,11	0,11	-0,13	0,02	0,02	0,02	0,18	0,18
Скорость резания V , м/мин	-0,06	-0,06	-0,09	-0,09	-0,13	-0,13	-0,15	-0,12	-0,18
Подача S , мм/об	0,24	0,24	0,21	0,22	0,20	0,19	0,12	0,15	0,09
Коэф. теплопроводности λ , Вт/мК	0,41	0,40	0,36	0,53	0,47	0,48	0,44	0,46	0,38
Оценка погрешности									
Достоверность адекватной модели, %	99,0	99,2	98,5	99,0	98,6	99,1	98,6	99,1	97,7
Критерий Стьюдента	0,013	0,010	0,019	0,013	0,018	0,011	0,018	0,011	0,029
Табличное значение F-критерия	2,554	2,643	2,393	2,554	2,420	2,596	2,420	2,596	2,227
Расчетное значение f-критерия	2,566	2,681	2,412	2,570	2,446	2,620	2,431	2,605	2,238
Средняя относительная погрешность, %	3,91	3,87	3,80	5,24	5,56	4,50	4,96	4,91	5,09

Для оценки погрешности расчета параметра шероховатости обработанной поверхности по полученным регрессионным моделям были определены восстановленные величины функции отклика R'' и установлена статистическая погрешность математических аппаратов для каждой комбинации режимов механической обработки. Так как для всех трех рассматриваемых видов регрессионных моделей все анализируемые факторы являются статистически значимы, следовательно, $R'=R''$. Результаты расчета восстановленных значений функции отклика приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты расчета значений функции отклика

Комбинация режимов обработки	Исходные данные	Линейная модель		Степенная модель		Показательная модель	
	R (Ra)	R"(Ra)	погрешность расчета, %	R"(Ra)	погрешность расчета, %	R"(Ra)	погрешность расчета, %
<i>Сталь 20</i>							
1	2,3	2,17	5,51	2,22	3,52	2,27	1,44
2	2,5	2,44	2,51	2,57	2,97	2,48	0,85
...							
26	3,0	2,71	9,64	2,88	3,93	2,66	11,25
27	3,2	3,09	3,42	3,19	0,27	3,03	5,40
<i>Сталь 20XH</i>							
1	2,4	2,15	10,45	2,32	3,27	2,29	4,60
2	2,5	2,56	2,39	2,81	12,33	2,61	4,40
...							
26	2,9	2,80	3,35	2,97	2,25	2,73	5,84
27	3,7	3,39	8,30	3,38	8,67	3,30	10,91
<i>Сталь 30ХМА</i>							
1	2,5	2,33	6,89	2,28	8,77	2,42	3,15
2	2,7	2,65	2,02	2,75	1,92	2,69	0,35
...							
26	2,8	2,62	6,36	2,84	1,49	2,56	8,65
27	3,2	3,08	3,80	3,23	1,01	2,98	6,98

Исходя из величины достоверности адекватности модели, в качестве математических моделей, описывающих влияние основных параметров обработки на показатель среднего арифметического отклонения профиля Ra, были выбраны математические модели следующего вида:

Для стали 20:

$$Ra = 2,49 \cdot V^{-0,04} \cdot S^{0,13} \cdot \lambda^{0,17} \quad (4.3)$$

Для стали 20XH:

$$Ra = 2,13 \cdot 0,999^V \cdot 2,041^S \cdot 1,008^\lambda \quad (4.4)$$

Для стали 30ХМА:

$$Ra = 2,74 \cdot V^{-0,10} \cdot S^{0,09} \cdot \lambda^{0,21} \quad (4.5)$$

Из выражений (4.3) - (4.5) видно, что с увеличением скорости резания происходит уменьшение величины шероховатости обработанной поверхности, а с увеличением подачи - величина шероховатости возрастает, что согласуется с традиционны-

ми представлениями теории резания металлов. Следует отметить, что, в отличие от традиционных представлений о процессе формирования шероховатости поверхности, согласно которому наибольшее влияние на величину показателя шероховатости оказывает подача, полученные математические модели позволили установить, что несмотря на значительное влияние подачи, наибольшее влияние на величину параметра шероховатости оказывает теплопроводность инструментального материала.

На основании полученных математических моделей при вышеуказанных условиях обработки, в алгоритм управления системы могут быть заложены следующие ограничения по диапазону регулирования подачи, позволяющие обеспечить стабильное получение в процессе обработки шероховатости в рамках одного класса как в пределах одной детали, так и при обработке партии деталей:

- при обработке стали 20

$$S_{\max} \leq 9 \cdot 10^{-4} \cdot R_a^{7,69} \cdot V^{0,31} \cdot \lambda^{-1,3} \quad (3.44)$$

- при обработке стали 20ХН

$$S_{\max} \leq 0,713 \cdot \ln \left(\frac{Ra}{2,13 \cdot 0,999^V \cdot 1,008^\lambda} \right) \quad (3.44)$$

- при обработке стали 30ХМА

$$S_{\max} \leq 1,4 \cdot 10^{-5} \cdot R_a^{11} \cdot V^{1,1} \cdot \lambda^{-2,3} \quad (3.44)$$

Выводы по главе 4

Исходя из поставленной технологической задачей, предложен способ управления процессом токарной обработки нежестких деталей, заключающий в управлении траекторией движения режущего инструмента, путем смещения его в радиальном направлении на величину отжатия элементов системы, с целью повышения размерной точности обработки, и одновременной силовой стабилизации процесса резания, путем регулирования величины подачи, для сохранения достигнутой точности во времени за счет стабилизации остаточных напряжений. Так как за счет управления траекторией движения режущего инструмента в значительной мере стабилизируется глубина резания, а следовательно и величина силы резания, значительно снижается диапазон необходимого ре-

гулирования подачи для силовой стабилизации процесса резания, что позволяет производить обработку на рациональных режимах.

В соответствии с предложенным способом управления разработаны структурная и функциональные схемы и алгоритм функционирования двухконтурной системы автоматического управления процессом токарной обработки. Первой контур управления направлен на снижение влияния систематических возмущающих воздействий, в частности, непостоянства податливости элементов технологической системы, на точность и качество обработки и реализован программно. Второй контур направлен на снижения влияния случайных возмущающих воздействий на точность и качество токарной обработки за счет силовой стабилизации процесса резания путем регулирования величины продольной подачи и может быть реализован за счет совместного применения встраиваемого тензометрического датчика силы с беспроводной передачей данных, настроенного на измерение радиальной составляющей силы резания, и возможностей программируемого логического контроллера (PLC) двигателя продольной подачи. Таким образом, система применима на станках с ЧПУ без необходимости их модернизации.

Для реализации первого (программного) контура управления разработанной системы разработано специальное программное обеспечение "Non-rigid shaft", позволяющее автоматически формировать управляющую программу для станка с ЧПУ. Данный программный модуль также применим для оценки точности, ожидаемой при обработке, без применения системы управления.

Так как величина подачи оказывает непосредственное влияние на шероховатость обработанной поверхности, для алгоритма функционирования второго контура системы управления были разработаны уточненные математические модели процесса формирования шероховатости обработанных поверхностей и ограничения по допустимому диапазону регулирования подачи, позволяющие обеспечить стабильное получение в процессе обработки шероховатости в рамках одного класса как в пределах одной детали, так и при обработке партии деталей. Полученные математические модели позволили установить, что несмотря на значительное влияние подачи, наибольшее влияние на величину параметра шероховатости оказывает теплопроводность инструментального материала.

Глава 5. Промышленное применение разработанной системы автоматического управления при обработке нежестких валов

Данная глава посвящена экспериментальной оценке эффективности применения разработанной системы управления для обеспечения требуемой точности токарной обработки деталей типа нежесткий вал. Все исследования, описанные в данной главе, проводились в условиях действующего производства на оборудовании, технические и технологические возможности которого приведены во второй главе. Также определена область применения разработанной системы и ожидаемый экономический эффект от её внедрения.

5.1. Экспериментальное исследование эффективности применения программного контура управления

Экспериментальное исследование эффективности применения программного контура управления для обеспечения точности размеров и формы нежестких валов проводилось в два этапа. Для проведения экспериментов были подготовлены две группы заготовок. В качестве заготовок использовался прокат обычной точности по ГОСТ 2590-2006 из стали 40Х, диаметром 40 мм (6 шт.). Перед проведением экспериментов для всех заготовок были проведены операции подрезки терцев в размеры 410 мм, зацентровки и предварительной токарной обработки до диаметров $33h12_{(-0,25)}$, после чего был произведен отожиг для снятия остаточных напряжений, сформированных на предыдущих этапах обработки. Затем заготовки были перецентрированы и разделены на две группы. Первая группа обрабатывалась без применения системы автоматического управления, вторая группа - с применением программного контура разработанной системы. Обработка велась на токарно-винторезном станке модели CA500C15Ф3 державкой PWLNL 2525-M08 ($\varphi=95^\circ$, $\varphi_I=5^\circ$, $\gamma=-6^\circ$; $\lambda=-6^\circ$) с пластиной WNMG080408-MP ($\alpha=0^\circ$, $r=0,8\text{мм}$) с покрытием NC3120 пр-ва «Korloy» до диаметра $32h9_{(-0,062)}$ при следующих режимах резания: $t=0,5$ мм, $V=100$ м/мин, $S=0,15$ мм/об.

После обработки измерялись следующие параметры точности: точность диаметрального размера в четырнадцати сечениях, отклонение от цилиндричности, мак-

симальное отклонение от круглости. Измерения проводились сразу после обработки на станке при помощи индикатора ИЧ-01-0,001 ГОСТ 9696-82 и микрометра МКЦ 25 ГОСТ 6507-90 с ценой деления 0,001 мм, и через 24, 72, 720 часов при помощи координатно-измерительной машины модели КИМ-1400. Шероховатость поверхности определялась сразу после обработки при помощи портативного профилометра TR200. Методика проведения измерений подробно описана в главе 2. Результаты измерений двух групп заготовок представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Результаты экспериментальных исследований эффективности применения программного контура управления

Номинальный диаметр		Ø32h9 _(-0,064)					
Условия обработки		без применения САУ			с применением САУ		
№ детали		1	2	3	4	5	6
Фактический диаметр в измеряемом сечении, мм							
Номер сечения	1	32,03791	32,02941	32,01074	31,98127	31,98495	31,98295
	2	32,03859	32,03519	32,01629	31,97802	31,98271	31,97918
	3	32,04538	32,04847	32,02871	31,98357	31,98117	31,98297
	4	32,05491	32,06353	32,04356	31,97898	31,98327	31,98027
	5	32,06448	32,08164	32,05827	31,97345	31,97537	31,97393
	6	32,07181	32,09211	32,06896	31,97151	31,97199	31,97164
	7	32,07573	32,09837	32,07486	31,97439	31,97279	31,97379
	8	32,07366	32,09679	32,07431	31,96863	31,97319	31,96977
	9	32,06707	32,08872	32,06767	31,97037	31,96797	31,96979
	10	32,05557	32,07389	32,05522	31,96672	31,96525	31,96525
	11	32,04143	32,05478	32,03874	31,96394	31,95988	31,96293
	12	32,02673	32,03391	32,02069	31,95700	31,95422	31,95631
	13	32,01451	32,01503	32,00472	31,95689	31,95258	31,95581
	14	32,00875	32,00323	31,99574	31,95691	31,95072	31,95536
Среднее значение отклонения от цилиндричности в партии деталей					без применения САУ		0,080413
					с применением САУ		0,029493
Снижение среднего значения от цилиндричности в партии деталей за счет применения САУ, %							272,65
Максимальное отклонение от круглости, мм							
Время, ч	0	0,02891	0,03185	0,02928	0,02161	0,02681	0,02227
	24	0,02928	0,03191	0,02998	0,02208	0,02701	0,02293
	72	0,02985	0,03199	0,03031	0,02249	0,02712	0,02311
	720	0,03016	0,03208	0,03132	0,02251	0,02731	0,02321
Среднее изменение значения отклонения от круглости в партии деталей в течении 720 часов, %					без применения САУ		3,76
					с применением САУ		3,21
Отклонение от цилиндричности, мм							
Время, ч	0	0,06698	0,09514	0,07912	0,02668	0,03423	0,02759
	24	0,09712	0,13129	0,11474	0,03251	0,04231	0,03319
	72	0,14374	0,19037	0,16864	0,03743	0,05017	0,03946
	720	0,18955	0,26821	0,22239	0,04675	0,05663	0,04834
Среднее изменение значения отклонения от цилиндричности в партии деталей в течении 720 часов, %					без применения САУ		281,37
					с применением САУ		75,22
Снижение величины коробления деталей в партии за счет применения САУ							4,47

Стоит отметить, что в процессе обработки без применения САУ возникали значительные вибрации, ухудшающие качество обработанной поверхности, в виду чего обработка велась со снижением скорости резания до 90 м/мин. При обработке с применением программного контура управления, в силу постоянства площади поперечного сечения срезаемого слоя за счет стабилизации глубины резания, вибрации практически не возникали. Фотография двух обработанных заготовок из разных групп показана на рисунке 5.1.

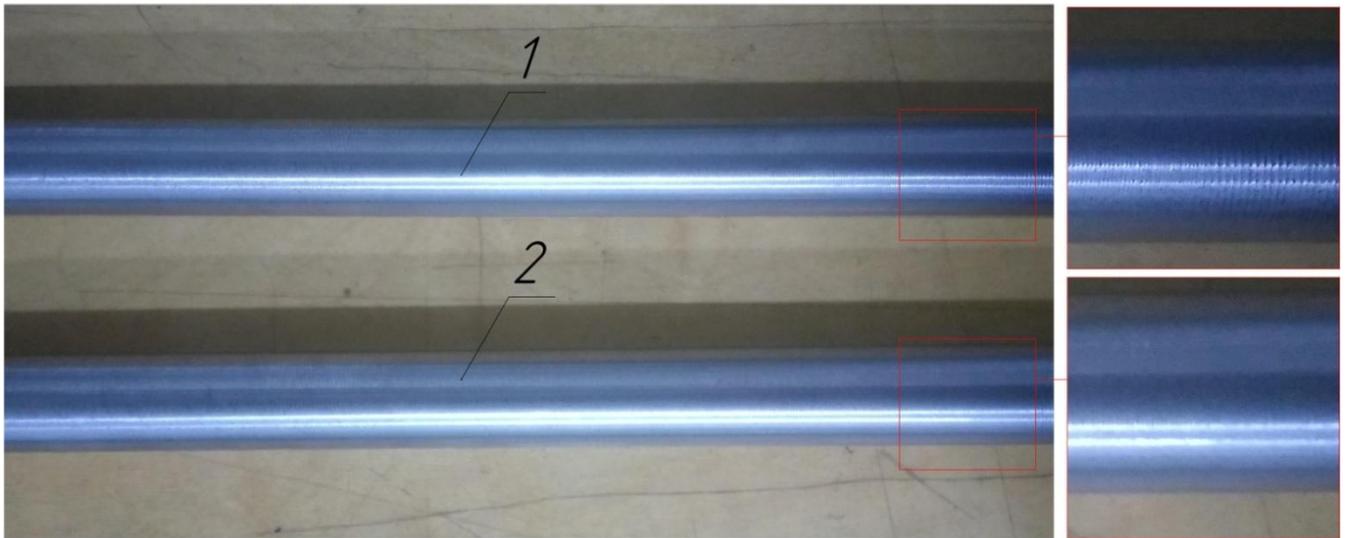


Рис. 5.1. Детали-представители : 1 - обработка без применения САУ, 2 - обработка с применением программного контура разработанной САУ.

Из таблицы результатов экспериментов видно, что при обработке деталей без применения системы САУ вся партия была изготовлена со значительными отклонениями от допустимой погрешности обработки. Фактически, полученная точность обработки соответствует по величине поля допуска по 10-му качеству. Кроме того, в течение тридцати суток отклонение от цилиндричности в первой группе увеличилось практически в три раза (с 0,0804 до 0,2267 мм в среднем для партии) и значительно превысило пределы допуска, установленные нормами точности. В то же время вся партия деталей, обработанных с применением САУ оказалась годной. При этом, отклонение от цилиндричности по истечению тридцати суток увеличилось в данной группе менее чем в два раза (с 0,0295 до 0,0506 мм в среднем для партии) и

осталось в пределах поля допуска. Отклонение от круглости в обеих группах отличалось несущественно и находилось в пределах допуска.

Кроме этого, по результатам экспериментов было зафиксировано незначительное улучшение шероховатости обработанной поверхности у заготовок второй группы. Так, шероховатость поверхностей заготовок первой группы после обработки составляла в среднем $Ra\ 3,2$, второй группы - $Ra\ 2,8$. При этом задача улучшения шероховатости обработанной поверхности в данной работе не ставилась, а существовала необходимость обеспечения постоянства шероховатости в рамках одного класса как в пределах одной детали, так и при обработки партии деталей. Данная задача была решена полностью.



а)



б)

Рис. 5.2. Изменение шероховатости поверхности детали:

а) обработанной без применения САУ; б) обработанной с применением САУ

Таким образом, исходя из полученных данных, видно, что применение программного контура разработанной системы автоматического управления позволяет: повысить точность токарной обработки нежесткого вала на 38-40%, а также снизить величину последующего искривление оси детали в среднем более чем в 4 раза по сравнению с обработкой без применения автоматического управления. Применение разработанного программного контура также позволило незначи-

тельно улучшить шероховатость обработанных поверхностей в пределах одного класса, а также незначительно повысить производительность обработки.

5.2. Определение ожидаемого экономического эффекта от использования разработанной системы управления при обработке детали «Винт».

Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанной системы управления определялся для детали «Винт» длиной 790₋₁ мм с наружной трапецеидально резьбой Tr32x6-6e, серийно выпускаемой на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады». Действующая технология предполагает следующие этапы обработки: предварительная токарная обработка наружной поверхности до Ø38₋₁, термическая обработка заготовки для достижения требуемых механических свойств, промежуточная токарная обработка до Ø34h12, отпуск для снятия внутренних напряжений, чистовая токарная обработка наружной поверхности с припуском 0,5 мм по диаметру под шлифовку, шлифование наружной поверхности Ø 32h9 для обеспечения цилиндричности заготовки в пределах 0,08 мм, последующая механическая обработка поверхностей детали. Применение разработанной системы управления позволит исключить необходимость проведения операции шлифования путем обеспечения требуемой точности формы и диаметральных размеров заготовки на операции чистовой токарной обработки.

Согласно действующему технологическому процессу, трудоёмкость T операции шлифования составляет 1,6 станко-часа. Стоимость станко-часа H , рассчитанная по методике [5] для операции шлифования, составляет - 2708 р. Годовая программа выпуска $N=32$ шт. Таким образом, суммарная стоимость выполняемых операций шлифования при изготовлении партии деталей составляет:

$$C_{об} = T \cdot H \cdot N = 138649,6 \text{ р.} \quad (5.1)$$

Учитывая стоимость программного обеспечения ($K_1= 12\ 000$ р) и стоимость годового сопровождения программного обеспечения ($K_2= 3\ 000$ р), экономический эффект от использования разработанной системы управления за счет исключения из технологического процесса операции шлифования составит:

$$\mathcal{E}_T = C_{об} - (K_1 + K_2) = 123649,6 \text{ р.} \quad (5.2)$$

Таким образом, прогнозируемый годовой экономический эффект от использования разработанной системы управления составит 123 649,6 рублей. Однако, стоит отметить, что номенклатура выпускаемых деталей, относящихся типу нежесткий вал, при производстве которых возможно достижение схожего экономического эффекта за счет применения разработанной системы управления, значительно шире. Так, к ним относятся детали типа цилиндр, шток, ось, гильза и т.д.

5.3. Расширение области применения разработанной системы автоматического управления.

Область применения разработанной системы автоматического управления может быть определена как получистовая и чистовая обработка гладких цилиндрических деталей типа нежесткий вал:

- из конструкционных и легированных сталей с физико-механическими характеристиками, схожим с исследуемыми сталями (20, 20ХН, 30ХМА);
- с соотношением длины к диаметру не более 25, так как при увеличении данного соотношения неминуемо возникают вибрации и обработку необходимо вести с применением люнетов;
- массой до 9,8 кг, так как при её превышении, прогиб вала под действием массы может оказать существенное влияние на точность обработки, соизмеримое с влиянием упругих деформаций технологической системы под действием сил резания.

Принципы управления, положенные в основу разработанной системы также применимы и в условиях черновой обработки. Однако, при черновой обработке наблюдается более значительная неравномерность припуска, в связи с чем требуется проведение дополнительных исследований. Область применения разработанной системы также может быть расширена в части применимости при обработке ступенчатых деталей, а также обработки заготовок большей массы и из других материалов за счет разработки соответствующего математического аппарата, однако, это является областью дальнейшего исследования.

Выводы по главе 5

Проведенные экспериментальные исследования эффективности применения разработанной системы автоматического управления показали, что применение программного контура разработанной системы позволяет повысить точность токарной обработки нежесткого вала на 38-40% без снижения производительности и шероховатости обработанных поверхностей, а также за счет силовой стабилизации процесса резания, снизить величину последующего искривление оси детали в среднем более чем в 4 раза по сравнению с обработкой без применения автоматического управления. Применение разработанного программного контура также позволило незначительно улучшить шероховатость обработанных поверхностей в пределах одного класса, а также незначительно повысить производительность обработки.

Прогнозируемый годовой экономический эффект от использования разработанной системы управления при изготовлении детали «Винт», серийно выпускаемой на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», за счет исключения из технологического процесса операции шлифования составит 123 649,6 рублей. Результаты работы приняты ко внедрению на АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады».

Основные результаты работы и выводы

1 На основании структурного анализа токарной обработки как объекта управления, установлено, что обработка может быть рассмотрена как два последовательно протекающих процесса: собственно процесс резания, рассматриваемый с точки зрения закономерностей изменения силовых характеристик в зависимости от режимных и технологических факторов, и процесс формирования показателей точности и качества обработки как совокупность закономерностей формообразования и силовых характеристик процесса резания (соответствует пункту 8 области исследований по специальности 05.02.08).

2 Анализ погрешности обработки, вызванной упругими деформациями и отжатыми элементами технологической системы, показал, что существенное влияние на точность обработки оказывают: изгиб оси вала, смещение линии центров и отжатие суппорта, вызванные действием радиальной составляющей силы P_r . На основании теоретических исследований получена уточненная математическая модель ожидаемой погрешности обработки нежесткого вала обрабатываемого в опорах, учитывающая влияние изменения податливости длинномерных валов по ходу обработки, обусловленное постоянным изменением соотношения длин обработанной и обрабатываемых частей заготовок, и взаимовлияние упругих деформаций и радиальной составляющей силы резания, выражающееся в непостоянстве глубины резания в виду постоянного изменения расстояния между осью детали и режущей кромкой инструмента. Применение предложенной математической модели, согласно экспериментальным исследованиям, позволит снизить практически в 2 раза относительную погрешность расчетов, а так же увеличить эффективность алгоритмов управления процессом обработки (соответствует пункту 3 области исследований по специальности 05.02.08).

3 Экспериментально подтверждено прямое влияние теплопроводности инструментального материала на величину радиальной составляющей силы резания при токарной обработке сталей перлитного класса и определена степень этого влияния для ряда сталей (стали 20, 20ХН, 30ХМА), а также разработаны соответствующие статистические математические модели, отражающие данные закономерности (соответствует пункту 2 области исследований по специальности 05.02.07).

4 Предложен способ управления процессом токарной обработки нежестких деталей, заключающий в управлении траекторией движения режущего инструмента, путем смещения его в радиальном направлении на величину отжатия элементов системы, с целью повышения размерной точности обработки, и одновременной силовой стабилизации процесса резания, путем регулирования величины подачи, для сохранения достигнутой точности во времени за счет стабилизации остаточных напряжений. Так как за счет управления траекторией движения режущего инструмента в значительной мере стабилизируется глубина резания, а следовательно и величина силы резания, значительно снижается диапазон необходимого регулирования подачи для силовой стабилизации процесса резания, что позволяет производить обработку на рациональных режимах (соответствует пунктам 2,7 области исследований по специальности 05.02.08).

5 Разработана двухконтурная система автоматического управления процессом токарной обработки, в основу которого заложен предложенный способ. Первой контур управления направлен на снижение влияния систематических составляющих погрешности обработки, в частности, непостоянства податливости элементов технологической системы и реализован программно, второй - на снижения влияния случайных возмущающих воздействий, основан на адаптивном прицепе и для своей реализации требует наличия программируемого логического контроллера (PLC) двигателя продольной подачи и тензометрического датчика силы (или иного силового сенсора). Таким образом, система применима на станках с ЧПУ без необходимости их модернизации и для своей реализации требует только включения в технологическую систему динамометра, устанавливаемого в стандартный резцедержатель (или иного силового сенсора), и соответствующего программного обеспечения (соответствует пунктам 1,4 области исследований по специальности 05.02.07).

6 Разработано специальное программное обеспечение "Non-rigid shaft" необходимое для реализации программного контура управления разработанной системы, позволяющее автоматически формировать управляющую программу для станка с ЧПУ. Данный программный модуль также применим для оценки точно-

сти, ожидаемой при обработке без применения системы управления (соответствует пункту 8 области исследований по специальности 05.02.08).

7 Экспериментально подтверждено прямое влияние теплопроводности инструментального материала на величину шероховатости поверхности при токарной обработке сталей перлитного класса и определена степень этого влияния для ряда сталей (стали 20, 20ХН, 30ХМА), а также разработаны соответствующие статистические математические модели, отражающие данные закономерности. (соответствует пункту 2 области исследований по специальности 05.02.07).

8 На основании полученных уточненных математических моделей разработаны ограничения по допустимому диапазону регулирования подачи для второго контура управления, позволяющие обеспечить стабильное получение в процессе обработки шероховатости в рамках одного класса как в пределах одной детали, так и при обработке партии деталей (соответствует пункту 7 области исследований по специальности 05.02.08).

9 В результате экспериментальных исследований эффективности разработанного программного контура управления установлено, что его применение при получистовой и чистовой токарной обработке нежестких валов позволяет повысить точность обработки в среднем на 38-40 % без снижения производительности и шероховатости обработанных поверхностей, а также за счет силовой стабилизации процесса резания, снизить величину последующего искривления оси детали в среднем более чем в 4 раза по сравнению с обработкой без применения автоматического управления (соответствует пункту 1 области исследований по специальности 05.02.07).

Список использованных источников

1. А. с. 1137663 СССР, В 23 В 1/00. Устройство для двухрезцовой обработки / О. И. Драчев. В. А. Тараненко. - 1984 - 7 с.
2. А. с. 1533164 СССР, В 23 Q 15/00. Способ автоматического управления процессом обработки нежестких осесимметричных деталей и устройство для его осуществления / О. И. Драчев. - 1989 - 6 с.
3. А. с. 1801737 СССР, В 24 В 29/04. Способ комбинированной обработки резанием и поверхностно-пластическим деформированием и устройство для его осуществления / Ю. В. Максимов, А.В. Анкин - 1993 - 4 с.
4. Абакумов А. М. Применение автоматических систем управления токарной обработки / Абакумов А. М., Денкевич В. П., Панарин В. Т. // Станки и инструмент. - 1973. - №3.-с. 31 -34.
5. Абрамова, И.Г.Определение стоимости станко–часа работы оборудования с использованием средств Microsoft Office Excel: метод. указания / Сост.: Абрамова И.Г. – Самара: Самарский университет, 2017. - 44с.
6. Автоматическое управление процессом точения мало жестких деталей / О.И. Драчев, А.Н. Кравцов; Науч. ред. В.Н. Тисенко; ВолгГТУ - Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012 - 250 с.
7. Адаптивное управление процессом резания с учётом ограничений по качеству обработанной поверхности / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко, А.А. Бондарев, Д.В. Крайнев // Научно-технологические аспекты развития машиностроения : сб. науч. тр. : матер. VIII междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 19-21 мая 2016 г.) / Московский автомобильно-дорожный гос. техн. ун-т (МАДИ). - Москва, 2016. - С. 246-248.
8. Адаптивное управление технологическими процессами. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Протопопов С.П. и др.- М.: Машиностроение, 1980. - 536 с.
9. Адаптивное управления станками / Под ред. Б.С. Балакшина. - М. Машиностроение, 1973. - 688 с.

10. Анализ влияния деформаций элементов технологической системы на точность обработки при точении деталей типа нежёсткий вал [Электронный ресурс] / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко, И.Н. Козачухненко, Е.Н. Смирнова // Modern Scientific Researches (Современные научные исследования) : Online Journal. - 2018. - Issue 4, vol. 1 (May). - 9-16. – URL : <https://www.sworld.education/msr/msr4-1.pdf>.
11. Анкин А.В. Повышение производительности и качества комбинированной обработки нежестких валов: автореф. дис. кандид. техн. наук. - Москва, 1993.-25 с.
12. Анкин А.В., Адеев А.С. Размерообразование при комбинированной режущо-деформирующей обработке с осевой осцилляцией // Известия Московского государственного технического университета МАМИ-2009.-№1.-с. 99-102.
13. Ахметшин Н. И. Вибрационное резание металлов. - М. Машиностроение, 1987.- 76 с.
14. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 2005. - 736 с.
15. Базров Б. М. Технологические основы проектирования самооднастраивающихся станков. - М.: Машиностроение, 1978.-216 с.
16. Балакшин Б. С. Основы технологии машиностроения. - М.: Машиностроение, 1969, - 559 с.
17. Беляев Г.С., Табачников П.И. Технология производства валов. М.: Машгиз, 1961. - 251с.
18. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машгиз, 1963. - 230 с.
19. Биргер И.А., Козлов М.Л. Остаточные напряжения: проблемы и перспективы. Материалы III Всесоюзного симпозиума Технологические остаточные напряжения. М.: ИПМ АН СССР, 1988. - 388 с.
20. Бондарев А. А. Исследование влияния опережающей пластической деформации на эффективность процесса резания конструкционных сталей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.07 Волгоград. 2016 - 175 с.
21. Бороздыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. - М.: Металлургия, 1978. -256 с.

22. Бржозовский Б.М. Динамический мониторинг технологического оборудования: монография / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин, М.Б. Бровкова. Саратов: Сарат.гос.техн.ун-т, 2008. - 312 с.
23. Бржозовский Б.М. Управление системами и процессами: учебник / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов. Саратов: Сарат.гос.техн.ун-т, 2008. - 236 с.
24. Быков Г.Т., Дорохин Н.Б., Маликов А.А., Ямников А.С. Точение нежестких заготовок многорезцовыми головками с подвижным люнетом-виброгасителем.// Известия ТулГУ. Технические науки. 2009. №1-1. С. 173-177.
25. Васильев, С.В. Термо-ЭДС при резании, как характеристика твердосплавных пластин // СТИН. –1976. –№ 5. – с. 27-28.
26. Васильевых Л.А. Интенсификация обработки нежестких деталей. -Иркутск: Издательство Иркутского университета, 1990.-280с.
27. Васильевых Л.А. Токарная обработка ступенчатых нежестких деталей // Известия ВУЗов, Машиностроение, № 11 - 1975. - с. 139-140.
28. Васильевых С.Л., Сайтов В.Е. Технологические средства для обеспечения виброустойчивости процесса точения нежестких валов // Современные наукоемкие технологии. -2014. -№ 3. -С. 7-11.
29. Верещака, А.С. Режущие инструменты с износостойкими покрытиями/ А.С. Верещака, И.П. Третьяков. –М.: Машиностроение, 1986.–192с.
30. Вивденко Ю.Н. Установление причин и путей предотвращения коробления деталей пониженной жесткости в процессе точения.-В кн.: Повышение эксплуатационных свойств деталей машин и инструментов. Сб. научи. трудов.-Иркутск: ИПИ, 1984. с.28-35.
31. Высшая аттестационная комиссия при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации [Электронный ресурс]: поисково-аналитическая система : справочные материалы: паспорта научных специальностей. URL: https://vak.minobrnauki.gov.ru/searching#tab=_tab:materials~ (дата обращения: 22.03.2020).

32. Гинкул С.П., Нестерова Н.В. Причины коробления валов при обработке резанием // Повышение качества изготовления деталей и изделий в машиностроении: Тезисы всесоюзного семинара. - М.: 1988 -С. 123-125.
33. Гузеев В.И., Батуев В.А., Сурков И.В. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением: Справочник / Под ред. В.И. Гузеева. - М.: Машиностроение, 2005. - 368 с.
34. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. - М.: Машиностроение, 1975. - 223с.
35. Дель Г.Д. Технологическая механика. - М.: Машиностроение, 1978,- 173 с.
36. Демин Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей / Ф. И. Демин, Н. Д. Проничев, И. Л. Шитарев; под. общ. ред. проф. Ф. И. Демина. - 2-е изд. - Самара: Изд-во СГАУ, 2012. -324 с.
37. Детали машин в примерах и задачах: Учеб. пособие / С.Н. Ничипорчик, М. И. Корженцевский, В.Ф. Калачев и др.; Под общ. ред. С.Н. Ничипорчика.- 2-е изд. - Мн.: Выш. школа, 1981. - 432 с.
38. Допуск формы как эквивалент величины прогиба детали в подсистеме обеспечения точности токарной обработки нежёстких валов на станках с ЧПУ / А.А. Жданов, А.Л. Плотников, Ю.Л. Чигиринский, И.В. Фирсов // Сборник научных трудов SWorld. - 2014. - Вып. 4, том 6. - с. 53-58.
39. Драгунов Ю.Г., Марочник сталей и сплавов / Ю.Г. Драгунов, А.С. Зубченко, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. Ю.Г. Драгунова и А.С. Зубченко - М.: Машиностроение, 2016. - 1216 с
40. Драчев О. И., Иванов О. И. Некоторые вопросы расчетов динамических характеристик процесса механической обработки мало жестких деталей на станках с ЧПУ. Куйбышев: Динамика станков с ЧПУ, 1986. — с. 100 — 108.
41. Драчев О.И. Основы расчета и проектирования систем автоматического управления в машиностроении: учебное пособие / Драчев О.И., Расторгуев Д.А., Соладатов А.А., Схиртладзе А.Г. Старый Оскол: ТНТ, 2009. - 168 с.

42. Драчев О. И. Особенности применения люнетов при обработке маложестких деталей / Драчев О. И., Расторгуев Д. А. //Межвузовский сборник научных трудов. Часть 2. - ТГУ. Тольятти, 2001. - с. 89 - 96.
43. Драчев О.И. Технология изготовления маложестких осесимметричных деталей / О.И. Драчев. - СПб. : Политехника, 2012. - 289 с.
44. Драчев О.И. Управление технологической наследственностью деталей малой жесткости / О.И. Драчев; Под ред. Ю.М. Соломенцева; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) - Ирбит: ОНИКС, 2011 - 192 с.
45. Драчев О. И. Энергосберегающая технология изготовления высокоточных длинномерных валов / Драчев О. И. // «Промышленный вестник», № 5, 2004. - с. 8 - 9.
46. Дудкин, Е. В. Эффективное использование твердосплавного инструмента / Е. В. Дудкин, А. Л. Плотников, А. Н. Рабинович // СТИН. –1977. –№ 11. –С. 30-31.
47. Заковоротный В.Л. Флек М.Б. Динамика процессов резания. Синергетический подход / В.Л. Заковоротный, М.Б. Флек. Ростов-на-Дону.: Терра, 2006. - 876 с.
48. Ингеманссон А. Р. Повышение эффективности точения труднообрабатываемых сталей ферритного, мартенситно-ферритного и мартенситного классов с использованием опережающего пластического деформирования : дисс. ... канд. техн. наук: 05.02.07 Волгоград. 2012.- 210 с.
49. Инструмент для современных технологий: Справочник / С. К. Беляев, Г. В. Бобровский, М. А. Волосова, С. Н Григорьев. и др.; Под общ. ред. А. Р. Маслова. – М.: Изд-во ИТО, 2005. –248 с.
50. Исследование точности при обработке валов в центрах на токарных станках / Ж. А. Мрожек. Г. Ф. Шатуров, Э. И. Ясюкович, Д. Г. Шатуров //Вестник БИТУ. Серия Металлургия. металлообработка. Машиностроение. - 2006. - № 3. - с. 30-34.
51. Кадыров Ж. Н. Диагностика и адаптация станочного оборудования ГПС / Ж. Н. Кадыров. - Л. : Политехника, 1991. - 141 с.
52. Клушин М. И. Резание металлов. - М: Машигиз, 1958. – 454 с.
53. Кораблев П. А. Двухсуппортная токарная обработка / Кораблев П. А. [и др.] - Уфа: Башкнигоиздат, 1968. - 63 с.

54. Корсаков В.С. Точность механической обработки. - М.: Машиностроение, 1961. -379 с.
55. Кравченко С.А. Повышение эффективности системы управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке / С.А. Кравченко, А.Ю. Набилкин, В.П. Бирюков // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). - Самара, 2012. - № 3-1 (34). - с. 339-348.
56. Кувалдин Ю.И. Технологические методы уменьшения остаточных деформаций изгиба на этапе предварительной обработки нежестких валов : автореф. дис. канд. техн. наук. - Москва, 1988.-16 с.
57. Куклев Л.С, Тазетдинов М.М. Оснастка для обработки нежестких деталей высокой точности.- М.Машиностроение, 1978.-104 с.
58. Кумабэ Д. Вибрационное резание: Пер. с яп. С. Л. Масленникова/Под ред. И. И. Портнова, В. В. Белова. - М.: Машиностроение,1985. — 424 с.
59. Маталин А. А. Технология машиностроения: Учебник для машиностроительных вузов по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. — 496 с.
60. Маталин А.А. Технология механической обработки. - Л.: Машиностроение, 1977. - 464 с.
61. Маслов А.Р. Конструкции прогрессивного инструмента и его эксплуатация. - М.: Издательство «ИТО», 2006.-166 с.
62. Математическая модель формирования радиальной составляющей силы резания при точении стали 20ХН / П.С. Нестеренко, Ю.Л. Чигиринский, А.А. Бондарев, Д.В. Крайнев, А.Р. Ингеманссон // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2016. - № 5 (184). - С. 32-35.
63. Машнев М.М., Красковский Е.Я., Лебедев П.А. Теория механизмов и машин и детали машин. - Л.: Машиностроение, 1980. - 512 с.
64. Медведев Д. Д. Автоматизированное управление процессом обработки резанием. - М.: Машиностроение, 1980. - 143 с.

65. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: Учебное пособие / Н.А. Спириин, В.В. Лавров, Л.А. Зайнуллин, А.Р. Бондин, А.А. Бурькин; Под общ. ред. Н.А. Спирина. - Екатеринбург: ООО «УИНЦ», 2015. - 290 с.
66. Мураткин Г.В. Повышение точности нежестких деталей типа валов путем управления их напряженным состоянием при обработке методами ППД: автореф. дис. кандид. техн. наук. - Тольятти, 2000.-16 с.
67. Набилкин А. Ю. Автоматизированная двухкальная каскадная система управления продольным профилем нежестких валов при токарной обработке : автореф. дисс. кандид. техн. наук. - Саратов, 2013.- 16 с.
68. Невельсон М.С. Автоматическое управление точностью металлообработки. - Л., Машиностроение, 1973. - 176 с.
69. Нестеренко П.С. Повышение точности токарной обработки нежестких валов за счёт управления упругими деформациями технологической системы / П.С. Нестеренко, Ю.Л. Чигиринский // Научные труды SWorld. - 2015. - Т. 4, вып. 3. - с. 84-89.
70. Нестеренко П.С. Повышение эффективности токарной обработки нежестких валов на станках с ЧПУ за счёт адаптивного управления процессов резания / П.С. Нестеренко // XXII Региональная конференция молодых учёных Волгоградской области (г. Волгоград, 21-24 ноября 2017 г.) : тез. докл. / редкол.: А.В. Навроцкий (отв. ред.) [и др.] ; Комитет молодёжной политики Волгоградской обл., Совет ректоров вузов Волгоградской обл., ВолгГТУ. - Волгоград, 2017. - с. 56-58.
71. Нестеренко П.С. Analysis of Influence of Strains of Technological System Elements on Machining Accuracy Under Turning of Non-rigid Shafts Based Between Centers / П.С. Нестеренко, Ю.Л. Чигиринский, Е.Н. Нестеренко // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; South Ural State University (National Research University), Moscow Polytechnic University, Platov South-Russian State Polytechnic University, Volgograd State Technical University. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1193-1201. – URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1>. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).

72. Обеспечение эксплуатационных свойств изделий при автоматизированном проектировании / О. И. Драчев, А.Н. Кравцов, Н.В. Кравцов; Под ред. Ю.М. Соколова; Закрытое акционерное об-во "ОНИКС" (Об-ние науч., инженерных и коммерческих структур) - Ирбит: ОНИКС, 2011 - 257 с.
73. Общемашиностроительные нормативы времени и режимов резания для нормирования работ, выполняемых на универсальных и многоцелевых станках с числовым программным управлением: Часть II Нормативы режимов резания / ЦБНТ. – М.: Экономика, 1990. – 474 с.
74. ОСТ 48-273-84 Инструкция технологическая. Порядок разработки, согласования и утверждения на предприятиях цветной металлургии.
75. Отений, Я. Н. Комбинированная обработка длинных валов / Я. Н. Отений, Н. И. Никифоров, А. И. Журавлев // СТИН. - 2006. - № 6. - С. 36-38.
76. Оценка интенсивности остаточных напряжений в валах при ППД / А.В. Трунин, Ю.И. Сидякин, С.Ю. Абакумова, В.Л. Маклецов // Известия ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 20 (123). - С. 67-70.
77. Официальный сайт ООО «Лапик» [Электронный ресурс] : продукция : Координатно-измерительная машина КИМ-1400 URL: <http://lapic.ru/catalog/koordinatno-izmeritelnaya-mashina-kim-1400-koordinatno-izmeritelnaya-mashina-kim-1400/> (дата обращения: 08.04.2020).
78. Пат. 2130360. Российская Федерация, МПК В23В 1/00, В23Q 15/00. Способ механической обработки нежестких осесимметричных деталей и устройство для его реализации / А. М. Абакумов, В. А. Тараненко, Г.В. Тараненко. - 1999. - 6 с.
79. Пат. 2162770. Российская Федерация, МПК В23В 23/00. Задняя бабка токарного станка / А. М. Абакумов, В. А. Тараненко, Г.В. Тараненко. - 2001. - 4 с.
80. Пат. 2245736. Российская Федерация, МПК В 23 В 1/00. Способ вибрационной обработки тел вращения / Д. А. Расторгуев, О. И. Драчев, Д.Е. Салабаев - 2005. - 8 с.

81. Пат. 2379168. Российская Федерация, МПК В23 Q15/00. Способ и устройство управления точностью обработки / В.С. Титов, М.В. Бобырь, Е.С. Яхонтова - 2010. - 12 с.
82. Пат. 2414994. Российская Федерация, МПК В 23 В5/08. Устройство для токарной обработки / Д. А. Расторгуев, О. И. Драчев. - 2011. - 6 с.
83. Пат. 2465115. Российская Федерация, МПК В23 Q15/00 / Способ и устройство управления скоростью резания на токарном оборудовании с ЧПУ / М.В. Бобырь. - 2012. - 16 с.
84. Пат. 2503532. Российская Федерация, МПК В24 В 39/04. Способ комбинированной обработки точением и поверхностным пластическим деформированием / Е.С. Киселев, О.В. Благовский, Р.С. Кабиров. - 2014. - 4 с.
85. Пат. 2533617. Российская Федерация, МПК В32 В1/00. Устройство для токарной обработки нежестких деталей / П.С. Нестеренко, В.К. Голованов. - 2014 - 8 с.
86. Петраков Ю.В. Теория автоматического управления в металлообработке: Учебн.пособие. - К.: ИЗМН, 1998. -218 с.
87. Петрешин Д. И. Разработка и создание самообучающейся технологической системы с адаптивным управлением параметрами качества поверхностного слоя деталей машин : автореф. дисс ... доктора технических наук.- Брянск, 2010.- 34 с.
88. Петрешин Д. И. Технологическое обеспечение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин на основе адаптивного управления : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08, 05.13.06.- Брянск, 2001.- 167 с.
89. Плотников А.Л. Управление режимами резания на токарных станках с ЧПУ : монография / А.Л. Плотников, А.О. Таубе; ВолгГТУ. – Волгоград : Волгогр. науч. изд-во, 2003. – 184 с.
90. Плотников А.Л. Управление параметрами процесса лезвийной обработки на станках с ЧПУ: монография / А.Л. Плотников, Науч. ред. А.П. Бабичев; ВолгГТУ - Тольятти: ЗАО «ОНИКС», 2012. – 231 с.
91. Подпоркин В.Г. Обработка нежестких деталей. - М.: Машиностроение, 1959. - 209 с.

92. Подураев В.Н. Обработка резанием с вибрациями. - М.: Машиностроение, 1970. - 350 с.
93. Приводы машин: Справочник / В.В. Длоугий, Т.И. Муха, А.П. Цупиков, Б.В. Януш; Под общ. ред. В. В. Длоугого. - 2-е изд., перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. — 383 с.
94. Пуш В. Э. Автоматические станочные системы / В. Э. Пуш, Р. Пигерт, В. Л. Сосонкин: Под ред. В. Э. Пуша — М.: Машиностроение, 1982. — 319 с.
95. Радзевич С.П. Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. Монография - К.: Растан, 2001. -592с.
96. Режимы резания металлов. Справочник. Изд. 3-е, перераб. и доп. / под ред. Ю.В. Барановского. - М.: Машиностроение, 1972 - 408 с.
97. Сергеев А. В. Повышение стабильности и точности формы мало жестких осесимметричных деталей путем автоматического управления положением инструмента : дисс. ... канд. техн. наук : 05.13.06 Тольятти, 2005 - 164 с.
98. Сидоров А. С. Мониторинг и прогнозирование износа режущего инструмента в мехатронных станочных системах: дисс. ... канд. техн. наук. 05.13.06 Уфа. 2007. - 201 с.
99. Системы Адаптивного Регулирования OМATIVE АСМ для металлообрабатывающих станков с ЧПУ: техническая спецификация - Смоленск: СтанкоСервис, 2013 - 31 с.
100. Скроган В.А., Амосов И.С., Смирнов А.А. Лабораторные работы по технологии машиностроения Учебное пособие для студентов вузов по курсу «Технология машиностроения». Изд. 2-е, перераб. и доп. - Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1974.— 192 с.
101. Соломенцев Ю.М., Басин А.М. Оптимизация процесса обработки с помощью адаптивного управления износом инструмента // Станки и инструмент - 1974, № 8. - с. 21-23.
102. Справочник нормировщика-машиностроителя. В 2 т. Т. 2. Техническое нормирование станочных работ / под ред. Е. И. Стружестраха. – М.: Государственное научно-техническое изд-во машиностроительной литературы, 1961. – 891с.

103. Справочник технолога машиностроителя. В 2 т. Т. 2. / под ред. А. Н. Малова. – 3-е изд. перераб. – М.: Машиностроение, 1973. – 568 с.
104. Справочник технолога-машиностроителя. В 2 т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М : Машиностроение, 1985. – 496 с.
105. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2. / А.М. Дальский [и др.]; под ред. А. М. Дальского [и др.]. –5-е изд., перераб. и доп. –М.: Машиностроение-1, 2003. –944 с.
106. Стали и сплавы. Марочник: Справ. изд. / В Г. Сорокин и др.. Науч. ред. В.Г. Сорокин, М.А. Гервасьев - М.: «Ингермет Инжиниринг», 2001. - 608 с.
107. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. – М.: Машиностроение, 1989. - 296 с.
108. Старков В.К. Физика и оптимизация резания материалов. – М.: Машиностроение, 2009. - 640 с.
109. Стискин Г.М. Прогрессивные приспособления и инструменты для токарных работ. - К.: Техника, 1982.-63 с.
110. Суслов, А. Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А. Г. Суслов. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
111. Суслов А.Г. Технология машиностроения: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов. - 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2007. -430 с.
112. Схиртладзе А.Г. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / А.Г. Схиртладзе, В.Н. Воронов, В.П. Борискин. Старый Оскол: ТНТ, 2008.-Т.1.-212 с.
113. Схиртладзе А.Г. Автоматизация производственных процессов в машиностроении / А.Г. Схиртладзе, В.Н. Воронов, В.П. Борискин. Старый Оскол: ТНТ, 2008.-Т.2.- 540 с.
114. Табаков, В. П. Влияние состава трехэлементных нитридных покрытий на тепловое и напряженное состояние режущего инструмента и интенсивность его износа / В. П. Табаков, А. В. Чихранов // СТИН. –2009. – № 10. – с. 20-26.

115. Талантов Н.В. Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента. – М.: Машиностроение, 1992. — 240 с.
116. Тихонов Н.В. Растяжение заготовок валов и ходовых винтов с целью стабилизации размеров. – Научно-техн. реф. сб.: Технология произв. научная орган, труда и управления, – вып.9, 1975. – с. 18-22
117. Тверской М. М. Автоматическое управление режимами обработки деталей на станках, – М.: Машиностроение, 1982. — 208 с.
118. Шелихов Е. С. Повышение точности изготовления нежёстких валов на станках с ЧПУ методом автоматической коррекции управляющей программы: дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06 Оренбург, 2016.- 182 с.
119. Щербаков М. Е. Повышение производительности процесса точения за счёт использования аппарата искусственных нейронных сетей // Автоматизация и современные технологии. 2007 №9. - с. 3-7.
120. Уваров В.В., Носова Е.А., Уварова В.С. Отечественная и зарубежная маркировка конструкционных сталей: Учеб. пособие, Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2004. - 34 с.
121. Чигиринская Н.В. Планирование эксперимента в задачах техники и экономики: Учебное пособие / Н.В. Чигиринская, Ю.Л. Чигиринский, А.С. Горобцов / ВолгГТУ, Волгоград, 2015. - 96 с.
122. Чигиринский Ю. Л. К вопросу выбора параметра регулирования в системах адаптивного управления процессом резания / Ю. Л. Чигиринский, П. С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2016. - № 14 (193). - С. 46-48.
123. Чигиринский Ю. Л. К вопросу управления точностью продольного профиля деталей типа нежёсткий вал / Ю. Л. Чигиринский, П. С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2017. - № 5 (200). - С. 43-45.
124. Чигиринский Ю.Л. Повышение эффективности токарной обработки нежёстких валов за счёт применения систем адаптивного управления / Ю.Л. Чигирин-

ский, П.С. Нестеренко // Современные материалы, техника и технологии. - 2015. - № 2. - С. 185-190.

125. Чигиринский Ю.Л. Повышение эффективности токарной обработки нежестких деталей за счёт применения системы адаптивного управления / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2015. - № 11 (173). - С. 36-39.

126. Чигиринский Ю.Л. Стохастическое моделирование в машиностроении: Учеб. пособие. / Ю.Л. Чигиринский, Н.В. Чигиринская, Ю.М.Быков.–Волгоград: ВолгГТУ, 2002. – 68 с.

127. Чигиринский Ю.Л. Inspecting the Quality of a Surface Layer in Non-Rigid Shafts Turning by Adaptive Control over the Process of Cutting / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко, Е.Н. Смирнова // Materials Science Forum. - 2019. - Vol. 973 : IX Int. Sci. and Techn. Conf. on Engineering – Innovation Technol. in Eng.: From Design to Production of Competitive Products (Volgograd, Sept. 2017) : Proc. / eds. A. Suslov, V. Lysak, Ju. Chigirinskiy [et al.] ; Volgograd St. Techn. Univ. - С. P. 212-218.

128. Ямникова О. А. Виброустойчивость процесса лезвийной обработки нежестких валов: дисс. ... доктора техн. наук. 05.03.01 Тула. 2005. - 356 с.

129. Ящерицын П.И. Теория резания: учеб. / П.И. Ящерицын, Е.Э. Фельдштейн, М.А. Корниевич - 2-е изд., испр. и доп. - Мн.: Новое знание, 2006. - 512 с.

130. Ящерицын П.И. Упрочняющая обработки нежестких деталей в машиностроении. - Мн.: Наука и техника, 1986. - 214 с.

131. Ящерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении (справ. пособие). - Мн.: Выш. шк., 1985. - 286с.

132. Ящерицын П.И., Рыжов Э.З., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. - Минск: Наука и техника, 1977. - 246 с.

133. Alaskari A. M., Oraby S. E. Adaptive control simulation to optimize metal removal for rough turning // Journal of Engineering Research Vol. 6 (№2), 2018 - pp.209-231.

134. Applications of Adaptive Control to Machine Tool Process Control / A. Galip Ulsoy and Yoram Koren // IEEE Control System Magazine, Vol. 9 (№ 3), 1989 - pp. 33-37.

135. Bin Zhang, Yung C. Shin. A multimodal intelligent monitoring system for turning processes // *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 35, 2018 - pp. 547-558.
136. Cutting forces assessment in CNC machining processes: A critical review / Vitor F.C. Sousa, Francisco J.G. Silva, José S. Fecheira, Hernâni M. Lopes, Rui Pedro Martinho, Rafaela B. Casais, Luís Pinto Ferreira // *Sensors*, Vol. 20 (№16), 2020 - pp. 4536-4562.
137. Efficiency of vibration signal feature extraction for surface finish monitoring in CNC machining / García-Plaza Eustaquio, López Pedro Nuñez J., González Elena María Beamud // *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 44, 2018 - pp.145-157
138. Error source diagnostics using a turning process simulator / Sung-Gwang Chen, A. Galip Ulsoy, Yoram Koren // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 120 (№2), 1998 - pp. 409-416.
139. Hopkins C., Hosseini A. A review of developments in the fields of the design of smart cutting tools, wear monitoring, and sensor innovation // *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 52(10), 2019 - pp. 352-357.
140. Implementation of low-sensitivity adaptive control systems in machining low-stiffness axisymmetric workpieces / Antoni Świć, Arkadiusz Gola, Łukasz Sobaszek, Natalia Šmidová // *IFAC-Papers OnLine*, Vol. 52, 2019 - pp 79-84.
141. Iterative learning based trajectory generation for machine tool feed drive systems / Hendrawan Y.M., Simba K.R., Uchiyama N.// *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 51, 2018 - pp. 230–237.
142. Juho Ratava, Mika Lohtander. Fuzzy feed rate and cutting speed optimization in turning // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(4), 2018 - pp. 2081–2092.
143. Korloy. *Металлорежущий инструмент Korloy.*– Южная Корея: Korloy, 2016.–1121 с.
144. Mathematical model of formation the axial component of the cutting forces at turning structural alloyed steel 3120 [Электронный ресурс] / П.С. Нестеренко, А.А. Бондарев, А.Р. Ингеманссон, Д.В. Крайнев, Ю.Л. Чигиринский // *Modern scientific research and their practical application : research bulletin SWorld : [электрон. журнал]*. - 2014. - № 6, vol. J11410 (Технические науки) / May 2014. - С. 232-238.

145. Micro-geometry surface modelling in the process of low-rigidity elastic-deformable shafts turning / Świć A., Gola A., Wołos D., Opielak M. // Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, Vol. 41 (№. 2), 2017, pp. 159-167.
146. Prediction of machining accuracy and surface quality for CNC machine tools using data driven approach / Hung-Wei Chiu, Ching-Hung Lee // Advances in Engineering Software, Vol. 114, 2017 - pp. 246-257.
147. Recent advances in turning processes using coated tools - a comprehensive review / Vitor F. C. Sousa; Francisco J. G. Silva // Metals - Open Access Metallurgy Journal, Vol. 10 (№2), 2020 - pp. 170-198.
148. Sandvik Coromant. Техническое руководство по точению. - Швеция: SandvikCoromant, 2015 . - 53 с.
149. SINUMERIK & SINAMICS Системы автоматизации для станков. Каталог NC 61. - Германия: Siemens, 2010. - 782 с.
150. Schmitz T. L., Smith K. S. Machining Dynamics - Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2019 - p.376
151. Stability analysis of modulated tool path turning / Ryan Copenhaver, Tony L. Schmitz, Scott Smith // CIRP Annals, Vol. 67, 2018 - pp. 49-52.
152. Świć A., Gola A., Wołos D. Analysis of typical structures of dynamic systems of machining of elastic-deformable shafts with low rigidity // Advances in Science and Technology Research Journal. Vol. 12, No. 3, September 2018. - pp. 1–9.
153. Świć A., Gola A. Control of Accuracy of Forming Elastic-Deformable Shafts with Low-Rigidity// Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 62, 2018, - pp. 107-114.
154. TeLC. Training of Technologies With TeLC made equipment. - Germany: TeLC, 2015. - 77 p.

Приложение А. Структура выпуска валов и структура общей трудоемкости в машиностроении

<i>Механическая обработка (35–50%)</i>		<i>Сборочные операции (25–30%)</i>	<i>Другие операции (10–20%)</i>
<i>Валы (до 30%)</i>	<i>Другие детали</i>		

Рис. А.1. Структура общей трудоемкости машиностроительной продукции [56]

<i>a)</i>	<i>Гладкие валы 20%</i>	<i>Ступенчатые валы 80%</i>
<i>b)</i>	<i>Валы высокой точности 70%</i>	<i>Валы обычной точности 30%</i>
<i>c)</i>	<i>Жесткие валы 60%</i>	<i>Нежесткие валы 40%</i>
<i>d)</i>	<i>Валы из конструкционных и низколегированных сталей 80–90%</i>	<i>Валы из других металлов</i>

Рис. А.2. Структура выпуска валов [56] (а — по форме, b — по точности, c — по жесткости, d — по материалу)

Приложение Б. Матрицы планирования экспериментов для случая построения математических моделей при обработке стали 20ХН

Таблица Б.1 – Матрица планирования экспериментов при построении модели формирования R_{γ}

№ опыта	Фактические результаты опытов					Нормированные значения			
	Φ_1 (t), мм	Φ_2 (V), м/мин	Φ_3 (S), мм/об	Φ_4 (λ), Вт/мК	R (P_{γ}), Н	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
1	0,5	90	0,083	11	302	-1	-1	-1	-1
2	0,5	90	0,083	27	326	-1	-1	-1	0
3	0,5	90	0,083	50	391	-1	-1	-1	+1
4	0,5	90	0,166	11	420	-1	-1	0	-1
5	0,5	90	0,166	27	438	-1	-1	0	0
6	0,5	90	0,166	50	465	-1	-1	0	+1
7	0,5	90	0,256	11	468	-1	-1	+1	-1
8	0,5	90	0,256	27	536	-1	-1	+1	0
9	0,5	90	0,256	50	648	-1	-1	+1	+1
10	0,5	135	0,083	11	263	-1	0	-1	-1
11	0,5	135	0,083	27	267	-1	0	-1	0
12	0,5	135	0,083	50	272	-1	0	-1	+1
13	0,5	135	0,166	11	307	-1	0	0	-1
14	0,5	135	0,166	27	340	-1	0	0	0
15	0,5	135	0,166	50	439	-1	0	0	+1
15	0,5	135	0,256	11	456	-1	0	+1	-1
17	0,5	135	0,256	27	504	-1	0	+1	0
18	0,5	135	0,256	50	557	-1	0	+1	+1
19	0,5	180	0,083	11	208	-1	+1	-1	-1
20	0,5	180	0,083	27	214	-1	+1	-1	0
21	0,5	180	0,083	50	265	-1	+1	-1	+1
22	0,5	180	0,166	11	275	-1	+1	0	-1
23	0,5	180	0,166	27	305	-1	+1	0	0
24	0,5	180	0,166	50	340	-1	+1	0	+1
25	0,5	180	0,256	11	342	-1	+1	+1	-1
26	0,5	180	0,256	27	396	-1	+1	+1	0
27	0,5	180	0,256	50	424	-1	+1	+1	+1
28	0,7	90	0,083	11	324	0	-1	-1	-1
29	0,7	90	0,083	27	367	0	-1	-1	0
30	0,7	90	0,083	50	392	0	-1	-1	+1
31	0,7	90	0,166	11	428	0	-1	0	-1
32	0,7	90	0,166	27	508	0	-1	0	0
33	0,7	90	0,166	50	523	0	-1	0	+1
34	0,7	90	0,256	11	516	0	-1	+1	-1
35	0,7	90	0,256	27	636	0	-1	+1	0
35	0,7	90	0,256	50	657	0	-1	+1	+1
37	0,7	135	0,083	11	287	0	0	-1	-1
38	0,7	135	0,083	27	336	0	0	-1	0
39	0,7	135	0,083	50	316	0	0	-1	+1
40	0,7	135	0,166	11	374	0	0	0	-1
41	0,7	135	0,166	27	422	0	0	0	0
42	0,7	135	0,166	50	462	0	0	0	+1
43	0,7	135	0,256	11	527	0	0	+1	-1
44	0,7	135	0,256	27	561	0	0	+1	0
45	0,7	135	0,256	50	552	0	0	+1	+1
46	0,7	180	0,083	11	232	0	+1	-1	-1
47	0,7	180	0,083	27	256	0	+1	-1	0
48	0,7	180	0,083	50	260	0	+1	-1	+1
49	0,7	180	0,166	11	322	0	+1	0	-1
50	0,7	180	0,166	27	353	0	+1	0	0
51	0,7	180	0,166	50	365	0	+1	0	+1
52	0,7	180	0,256	11	416	0	+1	+1	-1
53	0,7	180	0,256	27	443	0	+1	+1	0

54	0,7	180	0,256	50	463	0	+1	+1	+1
55	1,0	90	0,083	11	396	+1	-1	-1	-1
56	1,0	90	0,083	27	428	+1	-1	-1	0
57	1,0	90	0,083	50	510	+1	-1	-1	+1
58	1,0	90	0,166	11	528	+1	-1	0	-1
59	1,0	90	0,166	27	606	+1	-1	0	0
60	1,0	90	0,166	50	664	+1	-1	0	+1
61	1,0	90	0,256	11	665	+1	-1	+1	-1
62	1,0	90	0,256	27	807	+1	-1	+1	0
63	1,0	90	0,256	50	768	+1	-1	+1	+1
64	1,0	135	0,083	11	365	+1	0	-1	-1
65	1,0	135	0,083	27	388	+1	0	-1	0
66	1,0	135	0,083	50	426	+1	0	-1	+1
67	1,0	135	0,166	11	435	+1	0	0	-1
68	1,0	135	0,166	27	478	+1	0	0	0
69	1,0	135	0,166	50	584	+1	0	0	+1
70	1,0	135	0,256	11	632	+1	0	+1	-1
71	1,0	135	0,256	27	673	+1	0	+1	0
72	1,0	135	0,256	50	738	+1	0	+1	+1
73	1,0	180	0,083	11	304	+1	+1	-1	-1
74	1,0	180	0,083	27	308	+1	+1	-1	0
75	1,0	180	0,083	50	335	+1	+1	-1	+1
76	1,0	180	0,166	11	396	+1	+1	0	-1
77	1,0	180	0,166	27	422	+1	+1	0	0
78	1,0	180	0,166	50	463	+1	+1	0	+1
79	1,0	180	0,256	11	527	+1	+1	+1	-1
80	1,0	180	0,256	27	519	+1	+1	+1	0
81	1,0	180	0,256	50	551	+1	+1	+1	+1

Таблица Б.2 – Матрица планирования экспериментов при построении модели формирования Ra

№ опыта	Фактические результаты опытов				Нормированные значения		
	Φ_1 (V), м/мин	Φ_2 (S), мм/об	Φ_3 (λ), Вт/мК	R (Ra), мкм	Z_1	Z_2	Z_3
1	90	0,083	11	2,4	-1	-1	-1
2	90	0,083	27	2,5	-1	-1	0
3	90	0,083	50	3,4	-1	-1	+1
4	90	0,166	11	2,6	-1	0	-1
5	90	0,166	27	2,8	-1	0	0
6	90	0,166	50	3,6	-1	0	+1
7	90	0,256	11	2,8	-1	+1	-1
8	90	0,256	27	3,0	-1	+1	0
9	90	0,256	50	3,4	-1	+1	+1
10	135	0,083	11	2,3	0	-1	-1
11	135	0,083	27	2,6	0	-1	0
12	135	0,083	50	3,3	0	-1	+1
13	135	0,166	11	2,3	0	0	-1
14	135	0,166	27	2,7	0	0	0
15	135	0,166	50	3,4	0	0	+1
15	135	0,256	11	2,5	0	+1	-1
17	135	0,256	27	2,8	0	+1	0
18	135	0,256	50	3,4	0	+1	+1
19	180	0,083	11	2,1	+1	-1	-1
20	180	0,083	27	2,5	+1	-1	0
21	180	0,083	50	2,7	+1	-1	+1
22	180	0,166	11	2,3	+1	0	-1
23	180	0,166	27	2,5	+1	0	0
24	180	0,166	50	3,5	+1	0	+1
25	180	0,256	11	2,5	+1	+1	-1
26	180	0,256	27	2,9	+1	+1	0
27	180	0,256	50	3,7	+1	+1	+1

**Приложение В. Акт об использовании результатов исследования на
АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады»**

АО «Корпорация «Московский институт теплотехники»

Per. № 807



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНО-
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЦЕНТР
«ТИТАН – БАРРИКАДЫ»
(АО «ФНПЦ «ТИТАН – БАРРИКАДЫ»)
400071, г. Волгоград, пр. Ленина, 6/н
Тел. 74-93-26
Факс: (8442) 27-57-36, 27-40-20
E-mail: cdb@cdbtitan.ru

от _____ // _____

на _____

Об использовании результатов

УТВЕРЖДАЮ
Главный технолог,
кандидат технических наук
А.Р. Ингеманссон
«20» сентября 2019 г.

АКТ

об использовании результатов
кандидатской диссертационной работы
Нестеренко Павла Сергеевича

Комиссия в составе:

председатель Пилипенко П. А., начальник отдела новых технологий и производственных мощностей

(должность, ФИО)

члены комиссии: Евсеев Ю.Г., начальник отдела механической обработки опытного производства; Усов В.В., начальник отдела механической обработки серийного производства; Букоткин И.В., начальник отдела разработки УП для станков с ЧПУ и ОЦ

(должность, ФИО)

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Обеспечение точности формы и размеров нежестких валов при токарной обработке за счет программного управления траекторией движения режущего инструмента и силовой стабилизации процесса резания»

(тема диссертации)

представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в технологической деятельности _____

АО «ФНПЦ «Титан-Баррикады», г. Волгоград

(название организации)

при разработке технологии механической обработки детали «Винт» 20.01.01.004 в части использования программы для ЭВМ «Non-rigid shaft» для:

продолжение Приложения В.

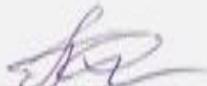
1. автоматизированного формирования текста управляющих программ обработки нежестких гладких валов на токарных станках с системами ЧПУ Siemens и Fanuc.
2. расчёта ожидаемой максимальной величины радиальной составляющей силы резания, а также ожидаемой погрешности обработки в зависимости от режимных параметров процесса резания.

Использование указанных результатов при обработке гладких нежестких валов позволяет:

- сократить объем чистовых и отделочных операций за счет повышения точности токарной обработки деталей типа нежесткий вал;
- повысить уровень автоматизации технологической подготовки производства в части подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ.

Результаты исследования могут быть использованы на машиностроительных предприятиях в качестве дополнительных расчетных методик к применяемой справочно-нормативной литературе при технологической подготовке производства, а также при разработке текста управляющих программ.

Председатель комиссии:



(подпись)

П.А. Пилипенко

(И.О.Фамилия)

Члены комиссии:



(подпись)

Ю.Г. Евсеев

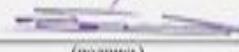
(И.О.Фамилия)



(подпись)

В.В. Усов

(И.О.Фамилия)



(подпись)

И.В. Букоткин

(И.О.Фамилия)



Приложение Г. Основные публикации по теме диссертационного исследования

Таблица Г.1. Основные работы, опубликованные по теме исследования

Библиографические данные	Специальность	
	05.02.07	05.02.08
Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:		
1. Голованов, В.К. Устройство автоматического управления процессом токарной обработки / В.К. Голованов, П.С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Серия "Прогрессивные технологии в машиностроении". Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 20 (123). - С. 15-17.	+	+
2. Чигиринский, Ю.Л. Повышение эффективности токарной обработки нежестких деталей за счёт применения системы адаптивного управления / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2015. - № 11 (173). - С. 36-39.	+	+
3. Чигиринский, Ю.Л. К вопросу выбора параметра регулирования в системах адаптивного управления процессом резания / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2016. - № 14 (193). - С. 46-48.	-	+
4. Математическая модель формирования радиальной составляющей силы резания при точении стали 20ХН / П.С. Нестеренко, Ю.Л. Чигиринский, А.А. Бондарев, Д.В. Крайнев, А.Р. Ингеманссон // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2016. - № 5 (184). - С. 32-35.	+	-
5. Чигиринский, Ю.Л. К вопросу управления точностью продольного профиля деталей типа нежесткий вал / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко // Известия ВолгГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. - Волгоград, 2017. - № 5 (200). - С. 43-45.	-	+
Охранные документы:		
6. Пат. 2533617 РФ, МПК В32В1/00. Устройство для токарной обработки нежестких деталей / П.С. Нестеренко, В.К. Голованов; ВолгГТУ. - 2014.	+	-
7. Пат. 2526228 РФ, МПК G01L1/22. Упругий элемент тензорезисторного датчика силы / В.К. Голованов, П.С. Нестеренко, Н.А. Положенцева; ВолгГТУ. - 2014.	+	-
Публикации в рецензируемых журналах и изданиях индексируемых в международных базах научного цитирования (Scopus):		
8. Нестеренко, П.С. Analysis of Influence of Strains of Technological System Elements on Machining Accuracy Under Turning of Non-rigid Shafts Based Between Centers / П.С. Нестеренко,	-	+

<p>Ю.Л. Чигиринский, Е.Н. Нестеренко // Proceedings of the 5th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2019) (Sochi, Russian Federation, March 25-29, 2019). Vol. II, part 2 / ed. by A. A. Radionov [et al.] ; South Ural State University (National Research University), Moscow Polytechnic University, Platov South-Russian State Polytechnic University, Volgograd State Technical University. – Cham (Switzerland) : Springer Nature Switzerland AG, [2020]. – P. 1193-1201. – URL : https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-22063-1. – (Book ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering – LNME).</p>		
<p>9. Чигиринский, Ю.Л. Inspecting the Quality of a Surface Layer in Non-Rigid Shafts Turning by Adaptive Control over the Process of Cutting / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко, Е.Н. Смирнова // Materials Science Forum. - 2019. - Vol. 973 : IX Int. Sci. and Techn. Conf. on Engineering – Innovation Technol. in Eng.: From Design to Production of Competitive Products (Volgograd, Sept. 2017) : Proc. / eds. A. Suslov, V. Lysak, Ju. Chigirinskiy [et al.] ; Volgograd St. Techn. Univ. - С. P. 212-218.</p>	+	+
<p>Публикации в других изданиях:</p>		
<p>10. Нестеренко, П.С. Повышение точности токарной обработки нежестких валов за счёт управления упругими деформациями технологической системы / П.С. Нестеренко, Ю.Л. Чигиринский // Научный взгляд в будущее. - 2016. - Вып. 1, т. 1 «Технические науки». - 21-26.</p>	-	+
<p>11. Адаптивное управление процессом резания с учётом ограничений по качеству обработанной поверхности / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко, А.А. Бондарев, Д.В. Крайнев // Научноёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения : сб. науч. тр. : матер. VIII междунар. науч.-техн. конф. (г. Москва, 19-21 мая 2016 г.) / Московский автомобильно-дорожный гос. техн. ун-т (МАДИ). - Москва, 2016. - С. 246-248.</p>	+	+
<p>12. Чигиринский, Ю.Л. Повышение эффективности токарной обработки нежестких валов за счёт применения систем адаптивного управления / Ю.Л. Чигиринский, П.С. Нестеренко // Современные материалы, техника и технологии. - 2015. - № 2. - 185-190.</p>	+	+