

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»
Политехнический институт
Факультет механико-технологический
Кафедра технологии автоматизированного машиностроения

РАБОТА ПРОВЕРЕНА

Рецензент, зав. лаб. МТП
ОАО «РосНИТИ», к.т.н.
_____ Е.В. Храмов
_____ 2018 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой,
д.т.н., профессор
_____ В.И. Гузеев
_____ 2018 г.

Повышение производительности токарной операции на станках с ЧПУ за счет
учета жесткости технологической системы

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА
К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЕ
ЮУрГУ–15.04.05.2018.582.00 ПЗ ВКР

Консультанты

Экономическая часть,
доцент, к.т.н.
_____ В.В. Батуев
_____ 2018 г.

Руководитель работы,
доцент, к.т.н.
_____ А.Х. Нуркенов
_____ 2018 г.

Автор работы,
студент группы П-261
_____ З.Р. Шаяхметова
_____ 2018 г.

Нормоконтролер,
доцент, к.т.н.
_____ И.В. Шмидт
_____ 2018 г.

АННОТАЦИЯ

Шаяхметова З.Р. Повышение производительности токарной операции за счет учета жесткости технологической системы – Челябинск: ЮУрГУ, П-261, 70 с., 24 ил., 24 табл., библиогр. список – 40 наим., 2 прил., альбом ил. ф. А4 – 16 с.

Выпускная квалификационная работа (ВКР) выполнена с целью повышения производительности токарной операции на станках с ЧПУ за счет учета жесткости технологической системы.

В выпускной квалификационной работе проанализированы существующие методы проектирования операций для токарных станков с ЧПУ, проанализированы методы определения жесткости технологической системы. Произведен расчет сил, влияющих на деталь при токарной операции. Рассчитана точность обработки с учетом отжимов в технологической системе.

В ходе выполнения работы разработана методика определения жесткости технологической системы. Разработана методика проектирования циклов контурной обработки на токарных станках с ЧПУ с учетом жесткости технологической системы.

Рассчитан ожидаемый экономический эффект от результатов выпускной квалификационной работы.

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.		Шаяхметова			Повышение производительности токарной операции на станках с ЧПУ за счёт учета жесткости технологической системы	Лит.	Лист	Листов
Провер.		Нуркенов А.Х.					6	70
Реценз.		Храмков Е.В.				ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»		
Н. Контр.		Шмидт И.В.				Кафедра ТАМ		
Утверд.		Гузев В.И.						

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ	12
Выводы по главе 1. Цели и задачи работы	16
2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	18
2.1 Экспериментальный метод	23
2.1.1 Статический метод	23
2.1.2 Динамический метод	24
2.2 Расчетный метод.....	28
2.3 Выводы по главе 2.....	29
3 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	30
Выводы по главе 3.....	41
4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ КОНТУРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ	42
Выводы по главе 4.....	45
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛА ТОЧЕНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ ...	47
Выводы по главе 5.....	55
6 РАСЧЕТ ОЖИДАЕМОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА	56
Выводы по главе 6.....	61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	62
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	64
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	64

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		7

ПРИЛОЖЕНИЕ А Алгоритм методики определения жесткости технологической системы 64

ПРИЛОЖЕНИЕ Б Алгоритм методики проектирования циклов 70

										Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.05.2018.582.00 ПЗ					8

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных методов металлообработки является точение. Обширную группу операций составляет токарная обработка на станках с ЧПУ. Разработка управляющей программы является важнейшим этапом проектирования технологического процесса. От качества разработанной управляющей программы зависит производительность технологического процесса, использование технологических возможностей станка и точность обеспечения заданных параметров качества поверхностей детали. Поскольку трудоемкость проектных работ составляет до 40-50% от всех затрат на изготовление изделия, то с учетом повышения уровня автоматизации, производительность производства становится зависимым от производительности и качества технологической подготовки производства. Наличие неопределенности в обеспечении заданных параметров качества поверхностей деталей, связанной с отсутствием однозначной и универсальной зависимости между первоначальной информацией о процессе резания, объекте управления, с требуемыми параметрами качества поверхностей деталей, делает актуальным создание методики проектирования токарной операции с учетом фактических условий обработки.

Точность обработки является главным показателем качества технологической системы и зависит от ряда факторов, таких как:

- геометрическая погрешность изготовления узлов станка и их износ;
- погрешность изготовления и износ инструментов;
- упругие деформации обрабатываемой заготовки;
- погрешность базирования;
- погрешность наладки станка;
- влияние тепловых деформаций технологической системы.

Один из базовых параметров технологической системы, характеризующих данные факторы является жесткость технологической системы. Жесткость рассчитывается по паспортным данным станка, не учитывая тот факт, что при экс-

									Лист
									9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.05.2018.582.00 ПЗ				

плуатации станок подвергается многочисленным внешним и внутренним воздействиям, под действием которых создаются условия для изменения первоначальных характеристик станка. Изменение выходных параметров станка оказывает существенное влияние на формирование значений параметров точности. Погрешности от упругих деформаций технологической системы составляют в отдельных случаях 80 % общей погрешности механической обработки.

В следствии отсутствия установленной зависимости между фактической и заданной величиной подачи, отсутствия обоснованной причины выбора постоянной глубины резания невозможно добиться требуемой точности обработки на токарных станках с ЧПУ при уменьшении времени обработки. А соответственно невозможно добиться желаемого качества производимых деталей.

В связи с актуальностью данной проблемы в работе поставлена цель – повышение точности и производительности на станках с ЧПУ за счет учета жесткости технологической системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- 1) анализ методов проектирования операций для токарных станков с ЧПУ;
- 2) анализ методов определения жесткости технологической системы для токарных станков с ЧПУ;
- 3) разработка методики определения жесткости технологической системы и проведение экспериментальных исследований;
- 4) разработка методики проектирования циклов контурной обработки на токарных станках с ЧПУ с учетом фактических условий обработки и проведение экспериментальных исследований;
- 5) анализ экспериментальных исследований.

Методы исследования:

Силовые характеристики системы исследовались с использованием методов математического моделирования с целью расчетного определения жесткости технологической системы. При решении поставленных задач использовались современные программные комплексы, такие как Mathcad, ADEM, КОМПАС-3D V17,

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

Diagram Designer 1.29. Экспериментальные исследования и измерения деформаций проводились на станке с ЧПУ EMCO TURN-E25 на базе Научно-образовательного центра ЮУрГУ «Машиностроение и металлургия» г. Челябинск.

Объект исследования – токарная операция.

Предмет исследования – режим резания.

Ожидаемые результаты:

– разработанная методика определения жесткости технологической системы для получения требуемой точности обработки деталей;

– разработанная методика проектирования циклов контурной обработки на токарных станках с ЧПУ с учетом фактических условий обработки для повышения производительности токарной операции.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		11

1 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИЙ ДЛЯ ТОКАРНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ

Одним из основных методов металлообработки является точение. Обширную группу операций составляет токарная обработка на станках с ЧПУ. Разработка управляющей программы является важнейшим этапом проектирования технологического процесса. От качества разработанной управляющей программы зависит производительность технологического процесса, использование технологических возможностей станка и точность обеспечения заданных параметров качества поверхностей детали. Поскольку трудоемкость проектных работ составляет до 40-50% от всех затрат на изготовление изделия, то с учетом повышения уровня автоматизации, производительность производства становится зависимым от производительности и качества технологической подготовки производства. Наличие неопределенности в обеспечении заданных параметров качества поверхностей деталей, связанной с отсутствием однозначной и универсальной зависимости между первоначальной информацией об процессе резания, объекте управления, с требуемыми параметрами качества поверхностей деталей, делает актуальным создание методики проектирования токарной операции с учетом фактических условий обработки.

Современные токарные станки позволяют производить сложную обработку деталей различных групп и обладают широкими техническими возможностями, но при этом остается значительной роль технолога и наладчика. При проектировании технологического процесса, величина глубины резания назначается постоянной ($T_1=T_2=T_3=T_4=T_5=T_6=T_7$), рисунок 1, а режимы обработки подбираются, исходя из усредненных значений справочников или из опыта самого оператора-наладчика или технолога. Процесс контроля износа резца и корректировки режимов резания производится так же наладчиком и технологом, что не всегда аргументировано к текущему состоянию технологической системы. Для обеспечения

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

максимального использования потенциала станка необходимо автоматизировать эти процессы.

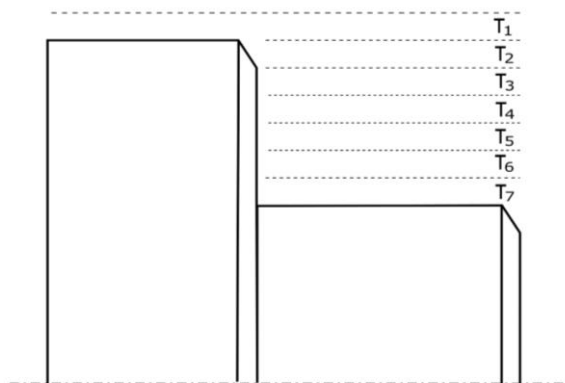


Рисунок 1– Проектирование токарной операции

Анализу исследований в области проектирования технологических операций посвящены работы многих ученых. В частности, Д. И. Петрешиной была разработана база данных по технологическим режимам механической обработки деталей машин для обеспечения показателей качества поверхностного слоя. Полученные во время работы параметры математических моделей заносились в базу данных самообучающейся технологической системы адаптивного управления и использовались при адаптивном управлении показателей качества поверхностного слоя. Результатом работы стали алгоритмы базового программного обеспечения и аппаратной части, реализованные в виде соответствующего программного обеспечения самообучающейся технологической системы адаптивного управления, на основе информационных потоков. Так же была определена степень влияния величины продольной подачи и скорости резания на формирование шероховатости обработанной поверхности при широком диапазоне изменения входных технологических факторов [1,6].

В работе А. А. Гейценредера сформирована структура блока мониторинга как неотъемлемой части интеллектуальной системы управления (ИСУ) технологической системы. Блок мониторинга позволил оценивать состояние станка, процесса обработки, а также геометрические характеристики конкретной детали. Такой способ функционирования обеспечил системе ИСУ возможность принятия

решений, основанных на достоверных фактах, на организационном и координационном уровнях [2].

В исследованиях С. А. Гришина обоснована возможность применения процедур стохастической аппроксимации для нахождения в режиме самообучения скорости резания, обеспечивающей заданную стойкость инструмента при токарной обработке и сверлении в условиях отсутствия данных о стойкостной зависимости [3].

В работе А. А. Буркова предложены нейронно-сетевые модели процесса резания для систем адаптивного управления станочным оборудованием и диагностики износа инструмента [4].

В исследованиях В.Б. Козулина, Г.А. Ищенко и А.Я. Зикно предложен метод адаптивного управления токарным станком с ЧПУ. Повышение производительности при черновой обработке достигается путем управления величинами частоты вращения шпинделя и подачи инструмента. Управляющие выходные параметры изменяются в зависимости от текущего радиуса детали и значения силового параметра. Изменение величины частоты вращения шпинделя обратно пропорционально изменению текущего радиуса детали, а величина подачи инструмента изменяется прямо пропорционально изменению частоты вращения шпинделя [5].

В работе А. О. Таубе разработана математическая модель назначения оптимального режима обработки, в основе которой лежат достоверные зависимости и оперативная информация из зоны резания. Методика, положенная в основу моделирования, позволила устранить неточности существующих способов расчета, ориентированных на осредненные справочные показатели, и позволила автоматизировать процесс выбора режимов резания, используя возможности микропроцессорных систем ЧПУ [7].

В своей работе А. В. Платонов произвел модернизацию контактно-щупового метода и модернизацию существующих приборов, главным образом, за счет разработки и введения в типовые существующие решения прибо-

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		14

ров устройств их автоматического управления и фильтрации с соответствующим программным обеспечением, а также за счет глубокого точностного исследования потенциальных возможностей приборов, работающих по контактно-щуповому методу, включая и оптимизированные методики их применения и наиболее достоверные способы их калибровки и настройки [8].

Г. Г. Позняк разработал четыре типовые математические модели динамики рабочего пространства металлообрабатывающих станков [9].

В своей работе Д. А. Белолапотков на основе теоретических и экспериментальных исследований установил информативный диапазон частот вибрации инструмента и получил аналитические зависимости виброакустического сигнала от режимов резания и износа инструмента, что позволяет повысить точность измерения размеров деталей машиностроения [10].

В исследованиях М. Ю. Захарченко предложена и разработана автоматизированная система контроля материала, размеров и параметров вибрации на основе струйного акустического, чувствительного элемента, позволяющая повысить качество контроля технологического процесса механической обработки деталей из различных материалов на станках с ЧПУ [11].

Проведенный анализ состояния проблемы показал, что разработка методов проектирования токарной операции на станках с ЧПУ на основе инструментов адаптивного управления началась с конца 90-х годов и ведется до сих пор, сопоставление направлений представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Сопоставление направлений исследований

Направление работы	Авторы	Суть	Недостатки
Самообучающаяся система управления	Д.И. Петрешин	Обеспечение качества поверхностного слоя	Ограниченное применение разработанных систем адаптивного управления
	А. А. Гейценрендер	Оценка состояния станка, процесса обработки	
	С.А. Гришин, А.А Бурков, Д.В. Дубовицкий	Обеспечение заданной стойкости инструмента	
	А.А Бурков, Д.И. Петрешин	Разработка нейронно-сетевой модели процесса резания	

Окончание таблицы 1

Направление работы	Авторы	Суть	Недостатки
Датчики активного контроля	Д.И. Петрешин, В.Б. Козулин, Г.А. Ищенко, А.Я. Зикно	Определение зависимости между режимами обработки и качеством поверхности	Недостаточная точность измерения параметров обрабатываемой заготовки
	А.О. Таубе	Разработка математической модели назначения оптимальных режимов обработки	
	А.В. Платонов	Разработка модернизированных щуповых профилометров	
	Г.Г. Позняк, Д.А. Белолопотков	Определение зависимости между параметрами колебаний и качеством поверхности	
	М.Ю. Захарченко	Определение параметров вибрации влияющих на качество поверхности	

Анализ существующих методов проектирования операций для токарных станков с ЧПУ показал, что нормативная база по проектированию циклов точения на основе нормативных справочников теряет свою актуальность ввиду широкой номенклатуры. При проектировании цикла точения учитывается только статическая жесткость технологической системы. Современное оборудование позволяет производить адаптацию управляющей программы для станков с ЧПУ с учетом параметров технологической системы, а именно жесткости.

Выводы по главе 1. Цели и задачи работы

- 1) Нормативная база по проектированию циклов точения на основе нормативных справочников теряет свою актуальность ввиду широкой номенклатуры.
- 2) Количество ступеней цикла является величиной заранее заданной, что существенно снижает область поиска оптимального цикла.
- 3) При проектировании цикла точения учитывается только статическая жесткость технологической системы.

4) На данный момент времени не существует методов оценки жесткости технологической системы на основе прямого измерения жесткости в процессе обработки.

5) Современное оборудование позволяет производить адаптацию управляющей программы для станков с ЧПУ с учетом параметров технологической системы, а именно жесткости.

Таким образом, на основе анализа области исследования формируется цель – повышение производительности токарной операции на станках с ЧПУ за счет учета фактической жесткости технологической системы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- 1) анализ методов проектирования операций для токарных станков с ЧПУ;
- 2) анализ методов определения жесткости технологической системы для токарных станков с ЧПУ;
- 3) разработка методики определения жесткости технологической системы и проведение экспериментальных исследований;
- 4) разработка методики проектирования циклов контурной обработки на токарных станках с ЧПУ с учетом фактических условий обработки и проведение экспериментальных исследований;
- 5) анализ экспериментальных исследований.

Объект исследования – токарная операция.

Предмет исследования – режим резания.

Ожидаемые результаты:

– разработанная методика определения жесткости технологической системы для получения требуемой точности обработки деталей;

– разработанная методика проектирования циклов контурной обработки на токарных станках с ЧПУ с учетом фактических условий обработки для повышения производительности токарной операции.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

2 АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Повышение качества изготавливаемых деталей в машиностроительном производстве требует определения и учета технологической жесткости применяемого станочного оборудования. Под технологической жесткостью станочной системы понимается жесткость ее нагруженной части, оказывающей влияние на расположение инструмента относительно обрабатываемой детали и точность обработки. При эксплуатации станков с ЧПУ в условиях автоматизированного производства данный фактор является причиной отжима инструмента, что приводит к повышенным отклонениям размеров обработанной детали.

Актуальной задачей при проектировании является разработка методов анализа влияния отдельных факторов, определяющих технологическую жесткость станков с автоматическим управлением [13]. Известно, что отклонения геометрической точности станка непосредственно приводят к появлению отклонений обрабатываемой детали, а влияние нежесткости (податливости) подсистем станка осуществляется через силы, действующие в процессе обработки. Величина этих сил зависит от элементов режима резания, неточности заготовки и от других факторов [12, 14].

Проблемам влияния жесткости технологической системы на точность обработки деталей посвящены работы многих ученых. В частности, А.А. Кошелевой, Л.А. Васиным на основе теоретических и экспериментальных исследований разработана модель для расчета фактической жесткости детали, учитывающая ее геометрические характеристик и способ установки [16].

В работе Е.О. Ивахненко, С.И. Клепикова предложена методика обеспечения точности обработки деталей на токарных станках, основанная на выборе рациональных технологических режимов обработки, ограничивающая влияние колебаний технологической системы на параметры точности обработки [17].

И.Г. Амраховым рассматриваются теоретические основы, методологические

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		18

принципы, математические модели синтеза и анализа технологических систем для реализации прогнозируемой и управляемой технологии обработки на основе динамической устойчивости процесса резания в структурном и параметрическом представлении, позволяющих решать актуальные научно-технические проблемы в области САПР ТС и ТП с целью повышения качества продукции машиностроения [18].

Р.В. Логинов в своем исследовании предлагает динамическую математическую модель процесса комбинированной режущо-деформирующей обработки на механической системе с дополнительным контуром связи переменной жесткости [19].

В работе А.Г. Ивахненко, О.И. Скарлыкиной была разработана математическая модель для учета значений некруглости, учитывающая характер и параметры колебаний с действительным значением силы резания, и предложена методика обеспечения заданных значений некруглости при токарной обработке [20].

В.В. Агафоновым сформированы теоретические основы описания влияния многокоординатной упругой системы станка на жесткость технологической системы и точность обработки для использования в математических моделях управления процессом обработки на станках, а также для определения нормируемых параметров станка, подлежащих обеспечению по критерию жесткости при проектировании [21].

А.В. Авилов в своей работе предложил математическую модель динамической технологической системы, позволяющую проанализировать изменение ее свойств в любой точке контакта инструмента с заготовкой, и прогнозировать влияние на технологическую систему износа режущего инструмента с целью обеспечения требуемого качества изделия при различных условиях обработки [22].

В работе В.В. Коновалова, А.А. Игнатьева, М.Ю. Захарченко было разработано методическое обеспечение для определения рационального режима токарной обработки колец подшипников, критериально оцениваемому по максимальному

									Лист
									19
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата					

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

запасу устойчивости динамической системы при изменении значений параметров технологического режима (подача инструмента и скорость вращения заготовки), целеориентированное на изготовление деталей с высокой производительностью с обеспечением заданной точности обработки деталей [23].

В статье Н.А. Серкова, И.С. Шлесберга, И.В. Никулевича, А.А. Мерзлякова представлены результаты экспериментального исследования жесткости 5-координатного станка. Представлена динамическая модель (блок – схема) несущей системы станка [24].

Авторами Р.Г. Кудояровым, Р.Р. Башаровым, О.Д. Прыковой установлена целесообразность использования разработанного расчетно-экспериментального метода расчета технологической жесткости станка для определения ожидаемой точности изготавливаемых деталей при различных условиях обработки. На основании анализа эпюр упругих перемещений шпиндельного узла базовой конструкции определен баланс, характеризующий влияние сопряжений, геометрических размеров, а также схемы шпиндельных опор, размеров пролета и передней консоли шпинделя [25].

Ф.С. Сабиловым, Н.А. Кочиневым, С.С. Шемякиным предлагается модель патрона, больше приближенная к реальным условиям и позволяет точнее идентифицировать инерционные и жесткостные параметры модели шпиндельного узла [26].

Сегодня активным направлением определения жесткости технологической системы занимается В.М. Утенков. В его работе описывается методика проектирования стоек металлорежущих станков, имеющих достаточную жесткость при минимальном весе конструкции. При составлении методики использован метод баланса градиентов. Проведены экспериментальные исследования жесткости моделей стоек металлорежущего станка, подтверждающие возможность практического использования выбранной методики моделирования [27].

Авторы М.В. Матрохин, Е.И. Федин, А.С. Ямников описали в своей работе алгоритм определения жесткости, как узлов станка, так и жесткости станка в це-

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

лом. Суть этого способа определения жесткости станка заключается в том, что берут максимальный диаметр заготовки и относительно большая глубина резания. В процессе резания контролируется радиальная составляющая сила резания P_y . Затем по предложенной формуле производится расчет жесткости узлов [28].

З.Г. Карпушевич, А.В. Трегубов разработали методику определения жесткости технологической системы. Суть данной методики заключается в том, что заготовку визуальнo делят на $n \geq 3$ равных частей. Также число испытаний должно быть равной числу равных частей, при этом у каждого испытания своя приложенная сила. В процессе испытания замеряются величины деформации, и получают линейную зависимость от радиальной силы. Полученные результаты позволяют определить жесткость технологической системы вблизи передней и задней бабки [29].

Авторы Л.А. Васин, С.А. Васин и Е.Н. Сержантова патента предложили способ определения жесткости токарного станка. Этот способ сформулирован следующим образом – производится обработка заготовки предварительно установленной на оправке, затем измеряют максимальные и минимальные отклонения обработанной поверхности от заданной формы и последующем расчете жесткости. Данный способ отличается от других тем, что с целью упрощения процесса используют оправку цилиндрической формы, на которой заготовки устанавливаются в различных осевых сечениях [30].

В статье «Анализ жесткости станков с использованием метода конечных элементов» Yu Lianqing, Wang Liping представили метод единого модуля и метод гибридного моделирования для анализа жесткости станков. Методы включают построение подходящих моделей конечных элементов, определение эквивалентных нагрузок, моделирование интерфейса между двумя модулями, рассмотрение граничных ограничений и интерпретацию результатов. Расчет жесткости станков требует моделирования полной структуры и компонентов методом конечных элементов. Также данный метод позволяет сформулировать базу данных с помощью которого можно произвести вычисления комплексных станков в короткий период

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		21

времени [39].

Sergiu Tonoiu, Madalin Catana в своей статье «Методология экспериментального определения статической жесткости для нормальных токарных станков» представили унитарную методику экспериментального определения статической жесткости для токарных станков. Также приводят пример применения данной методики для сборки главного шпинделя нормальных токарных станков [40].

Анализ исследования представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Исследование методов определения жесткости технологической системы

Авторы	Особенности	Допущения (недостатки)
А.А. Кошелева, Л.А. Васин, В.В. Коновалов, А.А. Игнатъев, М.Ю. Захарченко, З.Г. Карпушевич, А.В. Трегубов, С.А. Васин и Е.Н. Сержантова	Проектирование безвибрационного процесса токарной обработки	Разработана система проектирования, учитывающая влияние только дискретных условий обработки
В.М. Утенков, Тай Зар Чжо Нъюнт, Р.Г. Кудояров, Р.Р. Башаров, О.Д. Прыкова, Ф.С. Сабиров, Н.А. Кочинев, С.С. Шемякин, Н.А. Серков, И.С. Шлесберг, И.В. Никулевич, А.А. Мерзляков,	Оптимизация параметров конструкции узлов станка	Ограниченное применение спроектированного оборудования
Е.О. Ивахненко, С.И. Клепиков, О.И. Скарлыкина, А.Г. Ивахненко,	Разработка методики обеспечения точности обработки деталей, позволяющая ограничить влияние колебаний технологической системы на параметры точности обработки	Данная методика применяется только для конкретных деталей
Р.В. Логинов, А.В. Авилов, В.В. Агафонов, М.В. Матрохин, Е.И. Федин, А.С. Ямников, Yu Lianqing, Wang Liping, Sergiu Tonoiu, Madalin Catana	Моделирование динамической технологической системы, позволяющей проанализировать изменение ее свойств в любой точке контакта инструмента с заготовкой	Трудоемкость расчетов, жесткая привязка к конкретной технологической системе

Условно данные методы можно разделить на две группы – это экспериментальный метод и расчетный.

2.1 Экспериментальный метод

Сущность экспериментального метода определения жесткости заключается в том, что узлы станка с помощью специальных приспособлений нагружают силой, воспроизводящей действие силы резания, при этом измеряют перемещение отдельных узлов станка. Эти перемещения измеряются в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, так как они обуславливают погрешность обработки. При проведении экспериментальных исследований станка может проверяться влияние элементов режима резания на точность размеров обработанных деталей, что связано с большими затратами материальных средств и времени [37].

Экспериментальный метод можно разделить на два метода: статический и динамический.

2.1.1 Статический метод

Сущность статического метода определения жесткости заключается в том, что узлы станка с помощью специальных приспособлений нагружают силой, воспроизводящей действие силы резания, и при этом измеряют перемещение отдельных узлов станка. Перемещения узлов станка измеряются в направлении, нормальном к обрабатываемой поверхности, так как эти перемещения имеют основное значение и определяют погрешность обработки, обусловленную упругими деформациями технологической системы. Принципиальная схема определения перемещения одной детали узла относительно другой под действием прикладываемой силы показана на рисунке 2.

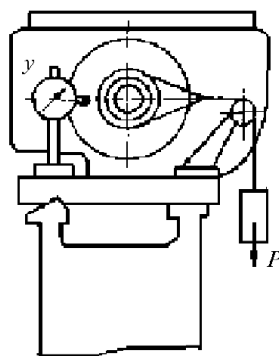


Рисунок 2 – Определение жесткости статическим методом

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		23

По мере увеличения массы груза, подвешенного на тросе, возрастает сила P , приложенная к концу шпинделя коробки скоростей. По показаниям индикатора, расположенного против точки приложения силы P по направлению ее действия, судят о перемещении конца шпинделя относительно станины станка. Полученные данные в виде точек наносят на график (рисунок 3) и получают нагрузочную ветвь характеристики жесткости узла. Затем, уменьшая нагрузку, строят разгрузочную ветвь. Площадь образовавшейся петли гистерезиса представляет собой работу, затраченную на преодоление сил трения, контактных деформаций и т. п.

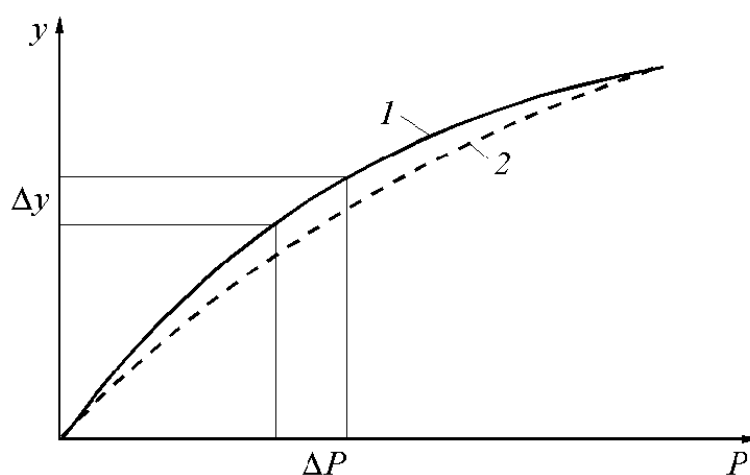


Рисунок 3 – Изменение упругих отжатий в зависимости от силы

Рассмотренный выше статический метод определения жесткости станков имеет существенные недостатки: он сложен и трудоемок. Кроме того, при определении жесткости не учитывается динамика процесса, что может существенно влиять на спроектированный цикл обработки [38].

2.1.2 Динамический метод

Динамический (производственный) метод заключается в том, что в производственных условиях на исследуемом оборудовании производится обработка ступенчатой заготовки с одного прохода (рисунок 4). При этом заготовка должна иметь высокую жесткость (в 5-6 раз большую жесткости станка и инструмента) для того, чтобы можно было условно пренебречь влиянием её деформации на точность обработки.

Обрабатываются два участка заготовки с разными припусками. Величина этих припусков выбирается исходя из ожидаемой величины колебания припусков при обработке всей партии деталей от t_{\min} до t_{\max} . При обработке участка с большей глубиной резания (t_{\max}) будут действовать большие силы резания, а следовательно, будут и большие упругие деформации технологической системы, чем на участке с малыми припусками (t_{\min}) и меньшими силами резания.

Поэтому на обработанной поверхности получается уступ из-за разных упругих деформаций системы на границе этих двух участках заготовки. Величина этого уступа соответствует возможной величине рассеивания размеров обрабатываемой партии для данных производственных условий.

Таким образом, с помощью производственного метода можно предсказать возможный разброс размеров обрабатываемой партии заготовок деталей, появляющийся из-за наличия колебаний жесткости упругой технологической системы.

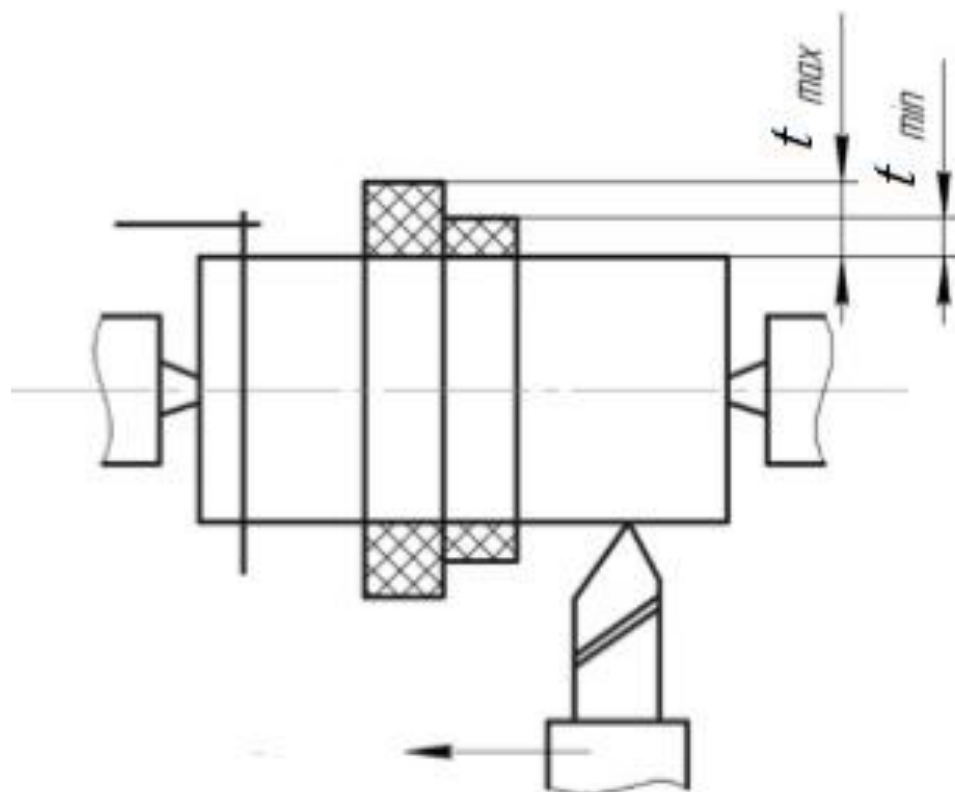


Рисунок 4 – Определение жесткости технологической системы производственным (динамическим) методом при обработке заготовок на токарных станках

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

25

Упругие перемещения технологической системы, вследствие непостоянства её жесткости по длине обработки, вызывают погрешности формы обрабатываемой поверхности, как в поперечном, так и в осевом сечениях.

Например, при обработке нежесткого вала в центрах токарного станка погрешность формы в поперечном сечении будет зависеть:

- от жесткости передней и задней бабок;
- от жесткости самого вала вдоль длины действия составляющей силы резания P_y .

Схема формирования упругих деформаций технологической системы от действия сил резания и их влияния на форму обрабатываемой поверхности для этого вида обработки показана на рисунке 5.

На схеме I показана упругая деформация технологической системы при разной жесткости передней и задней бабок станка, и абсолютной жесткости обрабатываемого вала.

На схеме II показана упругая деформация технологической системы при переменной жесткости вала вдоль длины обработки, и абсолютной жесткости передней и задней бабок станка.

На схеме III показана суммарная упругая деформация технологической системы с учётом жесткости как обрабатываемого вала, так и узлов станка.

Величина упругой деформации заготовки вала в поперечном сечении может быть определена по следующей формуле:

$$Y = \frac{P_y}{3EI} \cdot \frac{(L-X)^2 \cdot X^2}{L}, \quad (1)$$

где E – модуль упругости при растяжении (сжатии);

I – момент инерции;

L – длина обрабатываемой заготовки;

X – текущая координата обработки по длине вала.

Максимальная упругая деформация в середине вала будет рассчитываться по следующей формуле:

$$Y_{max} = \frac{P_y \cdot L^3}{48EI}. \quad (2)$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		26

При перемещении резца при обработке заготовки от задней бабки станка к передней радиальная составляющая силы резания P_y вызывает упругие деформации технологической системы, которые изменяются по сложной кривой (рисунок 5, схема III).

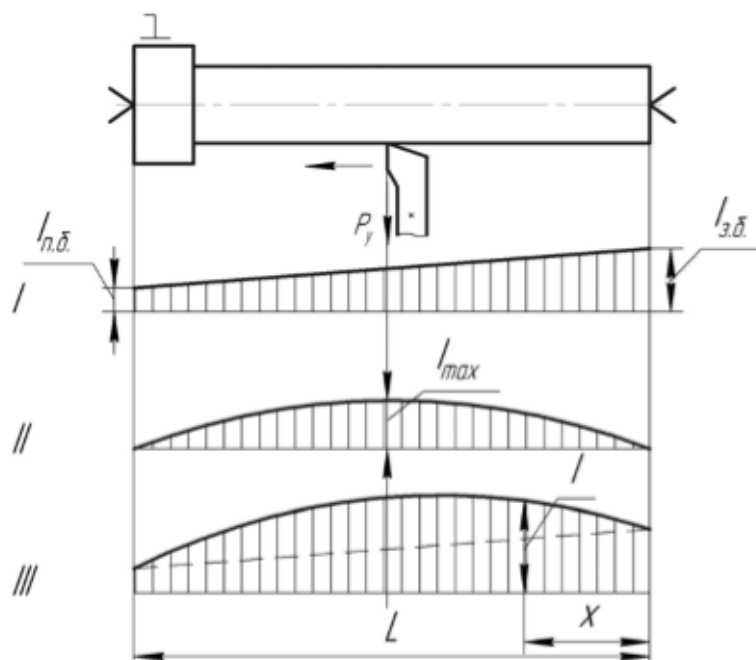


Рисунок 5 – Схемы формирования упругих деформаций технологической системы при обработке заготовки вала в центрах токарного станка

При обработке заготовки, установленной в патроне токарного станка, величина упругой деформации будет определяться по формуле:

$$Y_{max} = \frac{P_y \cdot L^3}{3EI}, \quad (3)$$

где L – максимальный вылет заготовки вала.

Причиной появления погрешностей размеров и формы обрабатываемых поверхностей может являться упругая деформация заготовки под действием сил закрепления. Это происходит в тех случаях, когда неверно рассчитана требуемая величина усилий закрепления или неправильно выбрана сама схема закрепления.

Данная методика позволяет определить жесткость только экспериментальным путем. Таким образом, для определения жесткости технологической системы для каждой партии деталей потребуются значительные затраты по времени и ре-

сурсам. Поэтому необходимо рассмотреть также расчетные методы определения жесткости технологической системы [33].

2.2 Расчетный метод

Расчетный метод предусматривает моделирование напряженно-деформированного состояния станочной системы и нахождение относительных смещений обрабатываемой детали и инструмента, что позволяет сделать выводы о влиянии нежесткости станка на точность относительного расположения исполнительных органов станка. При применении данного метода сложно учесть фактическое качество изготовления станка, что затрудняет уточнение характеристик упругих связей в модели станочной системы [34].

В результате анализа исследований процесса точения выбрана методика расчета жесткости технологической системы, представленная в диссертации П.П. Переверзева.

В диссертации П.П. Переверзева для определения жесткости технологической системы необходимо рассчитать податливость технологической системы. Податливость технологической системы – величина, обратная жесткости технологической системы. Податливость γ , мм/Н, – это способность сборочной единицы или технологической системы изменять относительное положение двух избранных точек под воздействием приложенной силы в направлении ее действия [35].

Податливость технологической рассчитывается по следующей формуле:

$$\gamma_d = \frac{P_y}{f_c} = \frac{1}{B \cdot E \cdot I} \cdot \left[\frac{B \cdot (2 \cdot z_2 + B) \cdot X^3}{12 \cdot l_d} - \frac{(X - z_1)^4}{24} + D_1 \cdot X \right] + \left[\frac{\gamma_{36} \cdot (2 \cdot z_1 + B)}{2 \cdot l_d} - \frac{\gamma_{п6} \cdot (2 \cdot z_2 + B)}{2 \cdot l_d} \right] \cdot \frac{X}{l_d - X} + \frac{\gamma_{п6} \cdot (2 \cdot z_2 + B)}{2 \cdot l_d}, \quad (4)$$

$$\text{при } D_1 = \frac{B \cdot (2 \cdot z_2 + B) \cdot l_d}{12} + \frac{B \cdot (2 \cdot z_2 + B)^3}{48 \cdot l_d} + \frac{B^4}{48 \cdot l_d} + \frac{z_2 \cdot B^3}{24 \cdot l_d}, \quad (5)$$

где z_1 , z_2 , B , l_d , X ($z_1 \leq X \leq z_1 + B$) – длина участков обрабатываемой детали для принятой схемы силового нагружения (рисунок 6);

E – модуль упругости, МПа;

I – осевой момент инерции, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

P_y – радиальная составляющая силы резания, Н;

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		28

f_c – упругая деформация оси центров и детали, мм;

$\gamma_{пб}, \gamma_{зб}$ – податливость передней и задней бабки, мм/Н.

Податливость передней и задней бабки рассчитывается через жесткость передней и задней бабки станка по формуле 6:

$$\gamma = \frac{1}{j}, \quad (6)$$

где j – жесткость технологической системы передней и задней бабки.

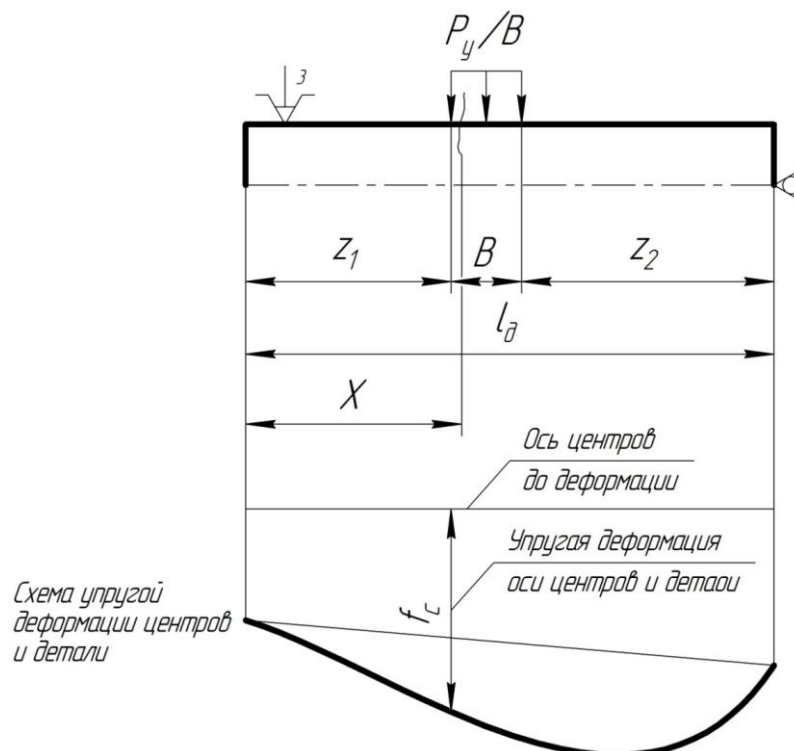


Рисунок 6 – Расчетная схема упругих деформаций технологической системы

2.3 Выводы по главе 2

1) Важным показателем, влияющим на производительность и точность обработки токарных станков с ЧПУ является жесткость технологической системы.

2) На данный момент времени не существует методов оценки жесткости технологической системы на основе прямого (фактического) измерения жесткости в процессе обработки.

3) Является целесообразным разработать комбинированную методику определения жесткости технологической системы на основе производственного и расчетного метода определения жесткости технологической системы.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1) Расчетно-экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования и измерения деформаций проводились на станке с ЧПУ EMCO TURN-E25 (рисунок 7) на базе Научно-образовательного центра ЮУрГУ «Машиностроение и металлургия» г. Челябинск. На рисунке 8 представлена кинематическая схема станка.

Целью данного эксперимента является определение жёсткости технологической системы, а именно жёсткость передней, задней бабки и жёсткость самой детали.



Рисунок 7 – Станок с ЧПУ EMCO TURN-E25

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		30

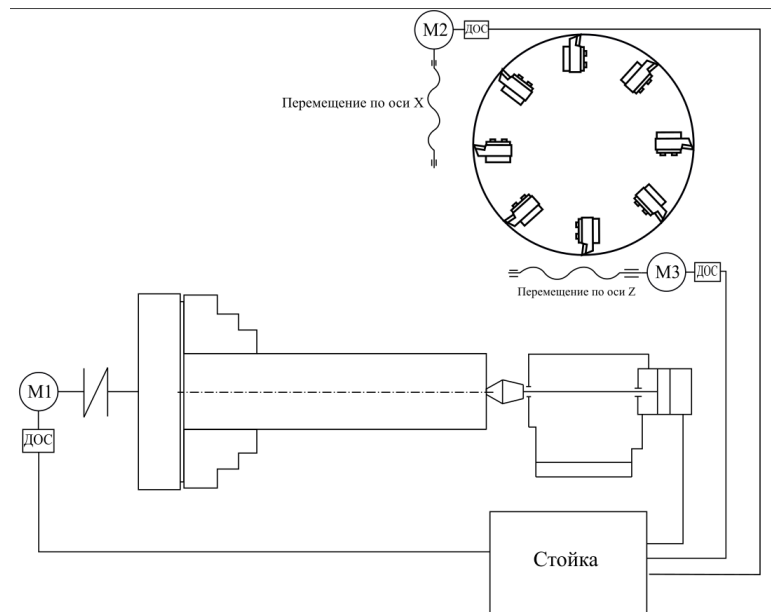


Рисунок 8 – Схема рабочей части станка с ЧПУ EMCО TURN-E25

Эксперимент проводится на основе измененного производственного метода, заготовка визуально разделяется на три равных частей. Разделение происходит из-за разных жёсткостей передней и задней бабки. Далее производится разделение на три ступени в каждой из трех участков. Первая ступень – номинал; вторая ступень – номинал плюс t_{min} ; третья ступень – номинал плюс t_{max} . Затем при одинаковой подаче и скорости резания осуществляется обработка двух последних ступеней с указанием конечного диаметра, равному номиналу. На рисунке 9 представлена схема проведения экспериментов, на рисунке 10 представлены, в последующем снимаемые ступени, на рисунке 11 представлена модель точения ступеней за один проход, на рисунке 12 представлено измерение диаметров после проведения эксперимента. За счет разной глубины и силы резания на двух последних ступенях будет наблюдаться отклонение от указанного номинала. Далее по формуле 7 рассчитывается жёсткость на трех участках.

$$j = \frac{P}{\Delta}, \quad (7)$$

где j – жесткость технологической системы, Н/мм;

P – сила резания, Н;

Δ – отжим заготовки, мм.

Замеры диаметров после точения производятся в двух сечениях, где ранее находились ступени (рисунок 12–13). Половина разности измеренных диаметров и номинала дает величину отжима. Отжим по сечениям рассчитывается по формулам 8, 9.

$$\Delta 1 = \frac{d_1 - d}{2}, \quad (8)$$

$$\Delta 2 = \frac{d_2 - d}{2}, \quad (9)$$

где $\Delta 1, \Delta 2$ – отжимы заготовки по ступеням;

d – диаметр до обработки;

d_1, d_2 – диаметр после обработки по ступеням.

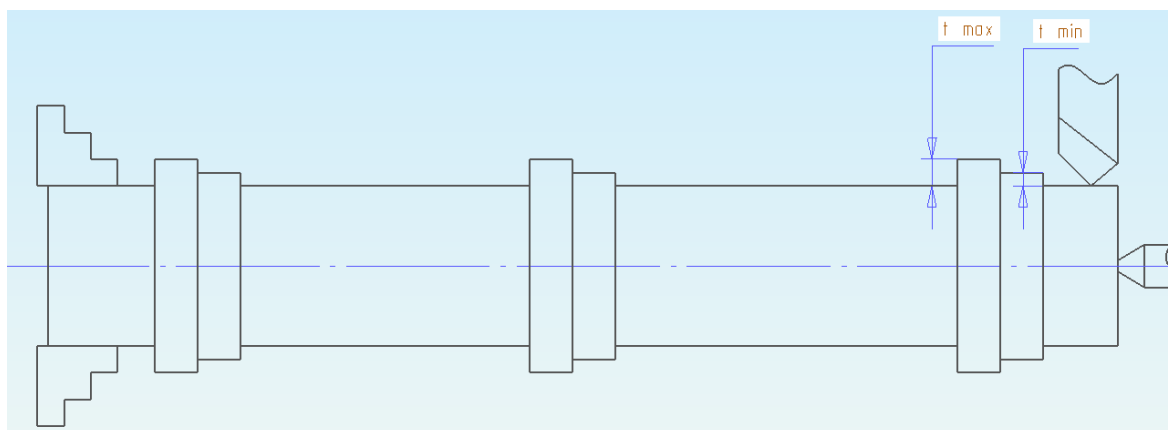


Рисунок 9 – Схема проведения эксперимента

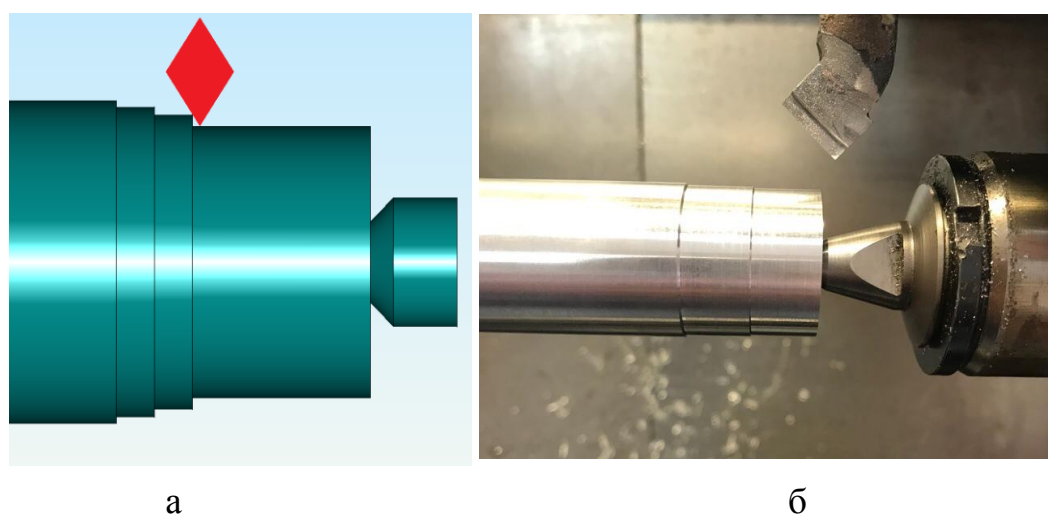


Рисунок 10 – Схема точения заготовки:

а) моделирование в САМ-системе, б) результаты обработки на станке

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

32

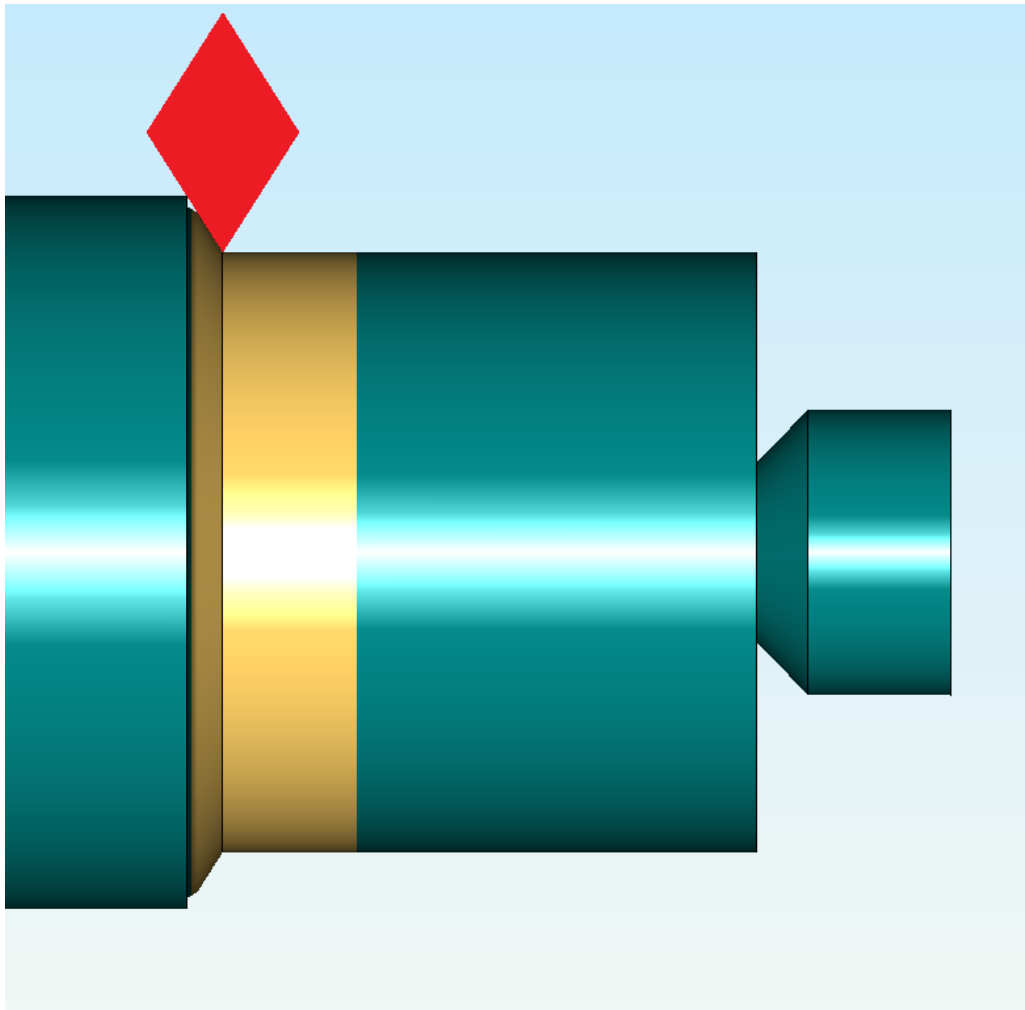


Рисунок 11 – Схема точения двух ступеней за один проход

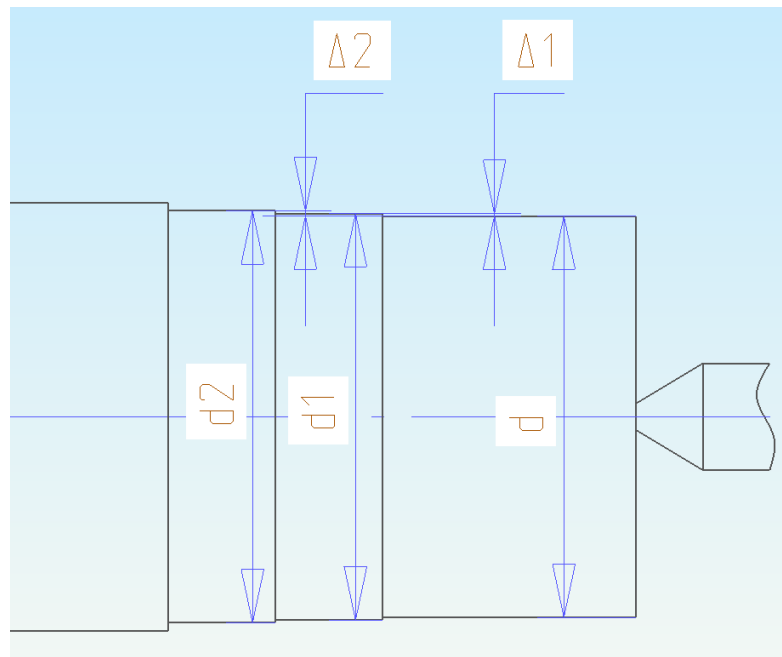


Рисунок 12 – Схема измерения

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

33



а

б

Рисунок 13 – Измерение диаметра:

а) в сечении 1, б) в сечении 2

Для чистоты эксперимента проведем обработку для трех разных материалов: Сталь 3, Алюминий Д16Т, Сталь 30Х13. Применяемый режущий инструмент (рисунок 14) для проведения экспериментов – левый проходной резец, материалом Т15К6, ширина державки резца 25 мм и высота 25 мм.



Рисунок 14 – Режущий инструмент

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

34

2) Расчет сил резания

При токарной операции в результате сопротивления срезаемого слоя материала, деформации сжатия, трения стружки о переднюю поверхность резца и ряда других причин на резец действуют силы P_z , P_y , P_x (рисунок 15).

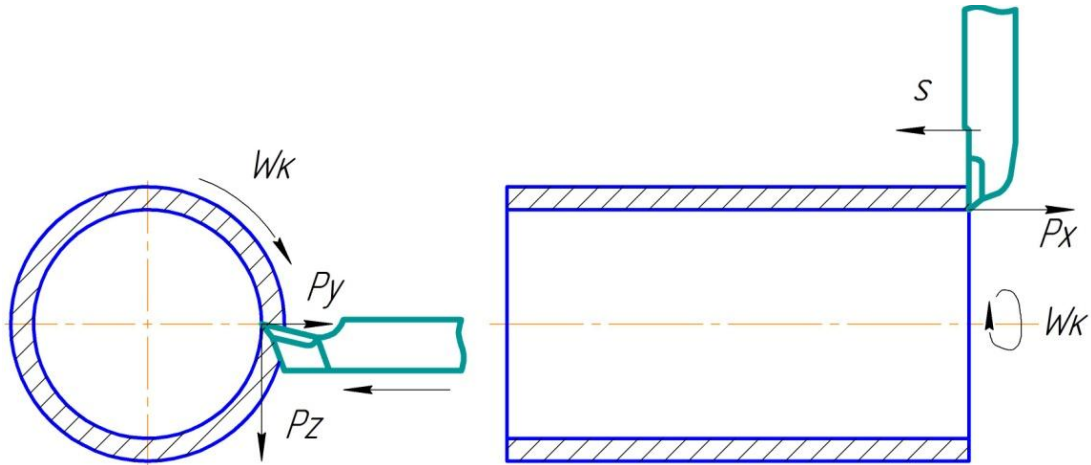


Рисунок 15 – Действия сил резания при точении

Силы, действующие на переднюю и заднюю поверхности инструмента, дают равнодействующую P . Для удобства расчётов равнодействующую силу P раскладывают на 3 составляющие: P_x – осевая составляющая, P_y – радиальная составляющая, P_z – тангенциальная составляющая.

Сила P_y оказывает влияние на возникновение упругих деформаций в технологической системе (отжимы детали) [36]. Составляющие силы резания определяются по формулам, выведенные В.И. Гузеевым:

$$P_x = 1,08 \sin \eta \left[[tg(\varphi - \eta) + tg\eta] \int_0^{S \cos \eta} \sigma_i B_1 \frac{\sin \varepsilon}{\sin \beta_1} dB_1 + [tg(\varphi - \eta) + S \sin \eta] \int_{\frac{\sin \varphi}{S \cos \eta}}^{\frac{t \cos(\varphi - \eta)}{\sin \varphi}} \sigma_i B_1 \frac{\sin \varepsilon}{\sin \beta_1} dB_1 + [tg(\varphi - \eta) + tg\varphi - \eta t \cos(\varphi - \eta) \sin \varphi B_1 \sigma_i (B_1 - B_1 i) \sin \varepsilon \sin \beta_1 dB_1 + 0,16 \sigma_i t 0,5 \pi \rho + l 3 \sin \varphi \sin \frac{\varphi}{2} (\varphi \pm \omega) + S 0,5 \pi \rho + l 3 \sin \frac{\varphi}{2} (\varphi \pm \omega) \sin \varphi \sin \varepsilon ; \right. \quad (10)$$

$$P_y = 1,08 \cos \eta \left[[tg(\varphi - \eta) + tg\eta] \int_0^{S \cos \eta} \sigma_i B_1 \frac{\sin \varepsilon}{\sin \beta_1} dB_1 + [tg(\varphi - \eta) + S \sin \eta] \int_{\frac{\sin \varphi}{S \cos \eta}}^{\frac{t \cos(\varphi - \eta)}{\sin \varphi}} \sigma_i B_1 \frac{\sin \varepsilon}{\sin \beta_1} dB_1 + tg\varphi - \eta + tg(\varphi - \eta) t \cos(\varphi - \eta) \sin \varphi B_1 \sigma_i (B_1 - B_1 i) \sin \varepsilon \sin \beta_1 dB_1 + 0,16 \sigma_i t 0,5 \pi \rho + l 3 \cos \varphi \sin \frac{\varphi}{2} (\varphi \pm \omega) + S 0,5 \pi \rho + l 3 \sin \frac{\varphi}{2} (\varphi \pm \omega) \sin \varphi \sin \varepsilon, \quad (11)$$

где β_1 – угол наклона условной плоскости сдвига, град;

φ – угол в плане главной режущей кромки, град;

φ_1 – угол в плане вспомогательной режущей кромки, град;

ω – угол наклона обрабатываемой поверхности к оси заготовки, град;

σ_i – интенсивность напряжений в зоне резания, МПа;

ξ – угол при вершине резца, определяется из выражения: $\xi = 180 - (\varphi + \varphi_1)$, град;

l_3 – длина площадки износа, мм;

η – угол, определяющий направление схода стружки при несвободном резании, град.

Угол η определяется по формуле (12):

$$\eta = \arctg \frac{t-h}{t \operatorname{ctg}(\varphi \mp \omega) + h \operatorname{ctg}(\varphi_1 \pm \omega)}, \quad (12)$$

где t – глубина резания, мм;

h – высота микронеровностей на обработанной поверхности, мм;

В свою очередь величина h определяется:

$$h = \frac{S \sin(\varphi \pm \omega) \sin(\varphi_1 \mp \omega)}{\sin[(\varphi \pm \omega) + (\varphi_1 \mp \omega)]}, \quad (13)$$

где S – подача, мм/об [37].

Так как обработка производится двух ступеней с разной глубиной резания, необходимо рассчитать силы резания для каждой ступени по формуле 11.

Обработка деталей производилась при следующих параметрах:

$\beta_1 = 20$, град.;

$\varphi = 45$, град.;

$\varphi_1 = 45$, град.;

$\omega = 90$, град.;

$\sigma_i = 430$ МПа (Алюминий Д16Т), 490 МПа (Сталь 3), 730 МПа (Сталь 30Х13);

$\xi = 180 - (\varphi + \varphi_1) = 180 - (45 + 45) = 90$, град.;

$l_3 = 1,5$, мм;

$S = 0,1$, мм/об.;

$t_1 = 0,2$, мм;

$t_2 = 0,5$, мм.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		36

В результате расчета получаются следующие значения *силы* P_y , представленные в таблице 3.

Таблица 3 – Значения составляющей силы резания P_y

Материал	P_y при $t=0.2$ мм, Н	P_y при $t=0.5$ мм, Н
Алюминий Д16Т ($\sigma_i=430$ Мпа)	39,611	89,672
Сталь 3 ($\sigma_i=490$ Мпа)	45,139	102,184
Сталь 30Х13 ($\sigma_i=730$ Мпа)	67,247	152,233

3) Проведение экспериментов

Полученные результаты в процессе эксперимента представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты эксперимента

№ прохода	Материал	Задняя бабка		Заготовка		Шпиндельная бабка	
		Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2
1 проход	Диаметр до обработки d , мм	24,980	24,395	24,980	24,390	24,980	24,380
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	24,010	24,010	24,010	24,010	23,980	23,990
2 проход	Диаметр до обработки d , мм	23,995	23,395	23,995	23,390	24,980	24,380
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	23,010	23,010	22,995	23,000	23,980	23,990
3 проход	Диаметр до обработки d , мм	23,000	22,400	23,995	23,390	22,995	22,380
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	22,010	22,015	22,995	23,000	22,010	21,995
№ прохода	Сталь 3	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2
1 проход	Диаметр до обработки d , мм	24,805	24,205	24,800	24,200	24,790	24,195
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	23,825	23,825	23,810	23,815	23,810	23,810
2 проход	Диаметр до обработки d , мм	23,805	23,225	23,810	23,210	23,801	23,200
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	22,835	22,830	22,820	22,820	22,805	22,810
3 проход	Диаметр до обработки d , мм	22,820	22,225	22,815	22,210	22,805	22,200
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	21,840	21,835	21,820	21,825	21,810	21,820

Окончание таблицы 4

№ прохода	Материал	Задняя бабка		Заготовка		Шпиндельная бабка	
		Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2
1 проход	Диаметр до обработки d , мм	24,805	24,210	24,795	24,180	24,770	24,165
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	23,820	23,820	23,800	23,800	23,785	23,790
2 проход	Диаметр до обработки d , мм	23,795	23,205	23,800	23,185	23,790	23,165
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	22,820	22,815	22,795	22,800	22,780	22,790
3 проход	Диаметр до обработки d , мм	22,795	22,210	22,790	22,190	22,780	22,180
	Диаметры после обработки d_1, d_2 , мм	21,815	21,815	21,795	21,80	21,790	21,795

На основе разницы фактического и заданного диаметра определяются отжимы в технологической системе (таблица 5).

Таблица 5 – Результаты обработки заготовок

№ прохода	Материал	Задняя бабка		Заготовка		Шпиндельная бабка		
		Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2	Ст. 1	Ст. 2	
1 проход	Алюминий Д16Т	$\Delta 1, \Delta 2$	0,015	0,0075	0,015	0,01	0	0,005
		$\Delta 1, \Delta 2$	0,01	0,0075	0	0,005	0	0,005
		$\Delta 1, \Delta 2$	0,005	0,0075	0	0,005	0,0075	0,0075
2 проход	Сталь 3	$\Delta 1, \Delta 2$	0,01	0,01	0,005	0,0075	0,01	0,0075
		$\Delta 1, \Delta 2$	0,015	0,0025	0,005	0,005	0,002	0,005
		$\Delta 1, \Delta 2$	0,01	0,005	0,0025	0,0075	0,0025	0,01
3 проход	Сталь 30X13	$\Delta 1, \Delta 2$	0,0075	0,005	0,0025	0,01	0,0075	0,0125
		$\Delta 1, \Delta 2$	0,0125	0,005	0,0025	0,0075	0,005	0,0125
		$\Delta 1, \Delta 2$	0,01	0,0025	0,0025	0,005	0,005	0,0075

4) Расчет жесткости технологической системы

В результате по формуле 7 рассчитывается жесткость технологической системы. Результаты полученных значений жесткости технологической системы ото-

бражены в таблице 6. Полученное среднее значение жесткости технологической системы можно использовать при проектировании цикла и при моделировании токарной операции.

Таблица 6 – Определение жесткости узлов станка

		Составляющая силы резания P_y , Н						Сред. жест. j , Н/мм
		Алюминий Д16Т		Сталь 3		Сталь 30X13		
		$t=0,2$ мм	$t=0,5$ мм	$t=0,2$ мм	$t=0,5$ мм	$t=0,2$ мм	$t=0,5$ мм	
		39,611	59,672	45,139	102,184	67,247	152,233	
Задняя бабка	1 пр.	5281,467	5978,13	4513,9	10218,4	13449,4	16513,3	8982,75
	2 пр.	5281,467	11956,27	18055,6	6812,27	13449,4	9908	
	3 пр.	5281,467	17934,4	9027,8	10218,4	26898,8	12385	
Шпиндельная бабка	1 пр.	7922,2	–	6018,53	10218,4	5379,76	16513,3	11999,7
	2 пр.	8726,6	–	9027,8	51092	5376,76	24770	
	3 пр.	5281,467	11956,27	4516,9	40873,6	8966,267	24770	

Данный способ определения жесткости технологической системы позволяет определить в первую очередь жесткость узлов технологической системы, что дает возможность расчетным способом, представленным в разделе 2.2 (формулы 4-6), определить упругие деформации заготовок различной конфигурации.

5. Расчет жесткости заготовки

Жесткость детали рассчитывается по формуле (14) через податливость детали.

$$j = \frac{1}{\gamma}, \quad (14)$$

где j – жесткость заготовки, Н/мм;

γ – податливость детали, мм/Н.

В результате расчета получают следующие значения жесткости заготовки, представленные в таблице 7.

Таблица 7 – Значения расчетной жесткости заготовки

Материал	j , Н/мм	E , Мпа
Алюминий Д16Т	3680	71000
Сталь 3	6426	200000
Сталь 30X13	6710	223000

В таблице 8 представлены значения жесткости, полученные экспериментальным методом. Значение жесткости принималось наименьшее из полученных.

Таблица 8 – Значения жесткости заготовки, полученной по предложенной методике определения жесткости

Материал	j , Н/мм
Алюминий Д16Т	3961,1
Сталь 3	6018,53
Сталь 30Х13	6724,7

В таблице 9 представлен сравнительный анализ жесткости, полученной расчетным и экспериментальным методами.

Таблица 9 – Сравнительный анализ

Материал	j , Н/мм (по методике)	j , Н/мм (экспериментальная)	Разница, %
Алюминий Д16Т	3680	3961,1	7,1
Сталь 3	6426	6018,53	-6,34
Сталь 30Х13	6710	6724,7	0,22

Из результатов видно, что чем больше модуль упругости материала, тем больше жесткость самой заготовки. Различные материалы обладают различной жесткостью, что в свою очередь, требует назначение различных режимов обработки, для получения необходимых показателей точности и качества.

Изменяемым параметром, минимизирующим отжатие вала, является подача, поскольку глубина и скорость резания являются постоянными величинами при черновой и чистовой обработке и выбираются до начала обработки, исходя из максимальной производительности и величины заданного припуска. Так как при перемещении резца от торца заготовки до ее середины прогиб вала увеличивается, то, чтобы остаться в заданных пределах допуска необходимо пропорционально уменьшать подачу, что равносильно уменьшению силы, действующей на вал.

Из таблицы 9 видно, что жесткость заготовки, определенной по предложенной методике определения жесткости имеет незначительное отличие от жесткости, определенной экспериментальным методом. Применение разработанной методики возможно для любых по конфигурации и материалу заготовок.

Для данной комбинированной методики разработан алгоритм, представленный в Приложении А.

Выводы по главе 3

Экспериментальное исследование жесткости технологической системы позволило установить следующие выводы:

1) При проектировании цикла точения необходимо учитывать существенное различие статической и динамической жесткости технологической системы.

2) Является не целесообразным применение на производстве способов оценки жесткости технологической системы на основе исследования микроремещений и виброускорений узлов станка в силу их трудоемкости.

В результате исследования способов определения жесткости технологической системы получены следующие результаты:

1) Разработан способ определения фактической жесткости на основе предварительного тестирования технологической системы.

2) Достоинство данного способа заключается в простоте использования и возможности оценки жесткости деталей любого типа, что позволяет производить тестирование технологической системы при проектировании цикла токарной обработки для единичной детали или партии деталей на токарном станке с ЧПУ.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

4 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЦИКЛОВ КОНТУРНОЙ ОБРАБОТКИ НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ С УЧЕТОМ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Для токарной обработки на станках с ЧПУ необходима управляющая программа. Качество и точность получения детали зависит от правильности написания управляющей программы, однако главной причиной является правильный подбор режимов резания. Режимы резания подбираются следующими способами: с помощью специальных справочников, либо из личного опыта технолога (оператора). Описанные способы подбора режимов резания являются приблизительными, и, невозможно подобрать режимы резания, при котором будут обеспечиваться не только требуемая точность и качество, но и высокая производительность.

Под повышением производительности токарной операции подразумевается, что подбираются максимальные показатели режимов резания. Однако это не позволит получить требуемую точность детали, для этого необходимо выявить ограничения, в данном случае этими ограничения послужат жесткость технологической системы. На рисунке 16 представлен процесс точения заготовки, установленной в трехлапчатый патрон с поджатием задним центром.

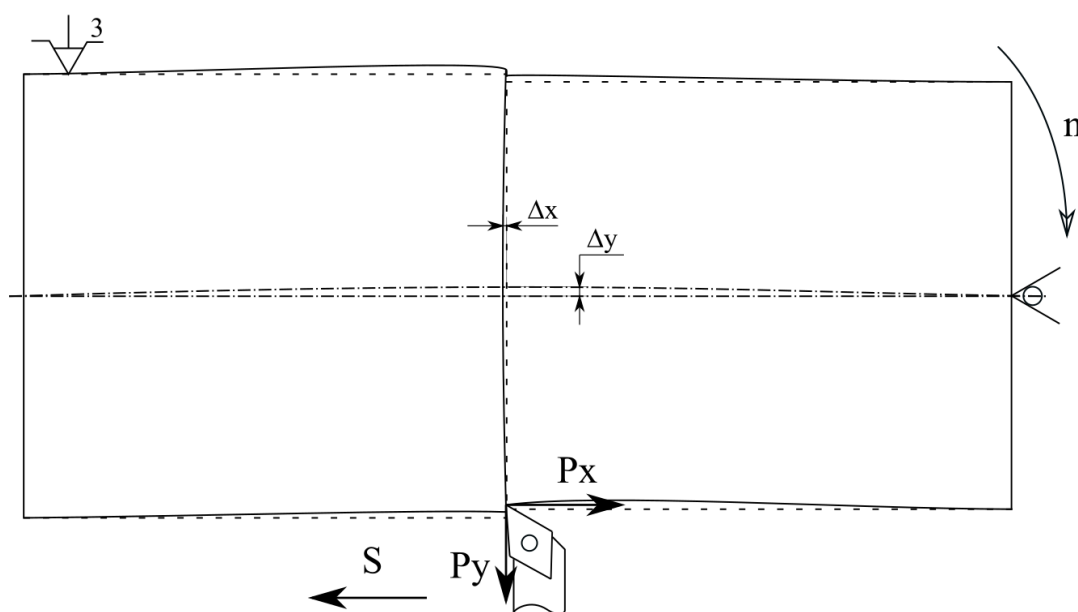


Рисунок 16 – Схема обработки нежестких валов

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		42

Для разработки методики повышения производительности с учетом жесткости технологической системы возьмем цикл контурного точения для токарного станка с ЧПУ FANUC (рисунок 17). Процесс проектирования циклов контурного точения наиболее полно был раскрыт авторами учебного пособия [26]. Цикл позволяет сократить время разработки управляющей программы (УП) при многопроходной обработке. Перед написанием УП необходимо определить вид заготовки и профиль контура детали. В процессе проектирования цикла контурной обработки необходимо указать точку начала цикла, затем описывается контур детали с указанием глубины прохода и подачей. Также необходимо указать величину отскока от обработанной поверхности. Пример написания цикла представлен ниже.

G73 U₁_ R_

G73 P_ Q_ U₂_ W_ F_

U₁_ – глубина резания на сторону;

R_ – отскок инструмента от обработанной поверхности на безопасное расстояние;

P_ – номер строки программы, с которой начинается описание контура детали;

Q_ – номер строки программы, в которой заканчивается описание контура детали;

U₂_ – припуск, оставляемый на чистовую обработку по оси X на сторону;

W_ – припуск, оставляемый на чистовую обработку по оси Z;

F_ – подача.

Основой разработки методики является обеспечение необходимой точности обработки детали. Жесткость технологической системы влияет на величину упругого перемещения (отжима), следовательно, по конструкторскому чертежу определяется допустимая величина отжима. Поскольку величина отжима определится, значит и определится составляющие силы резания, которая определяется по математическим моделям 10 и 11. Также для расчета по математическим моделям необходимы геометрические параметры режущей пластины.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		43

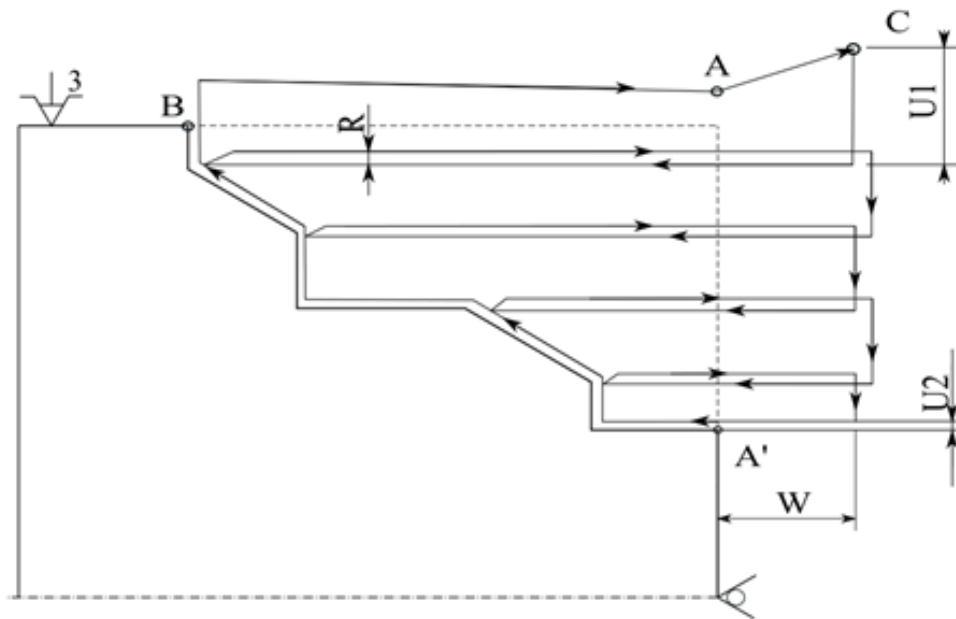


Рисунок 17 – Цикл контурного точения

Алгоритм данной методики выглядит следующим образом:

1) Определяются допустимые упругие перемещения Δx и Δy , в зависимости от требуемой точности обработки (рисунок 18). Из рисунка 18 следует что $\Delta y \leq \frac{T}{2}$, иначе после обработки возникнет исправимый брак, для исправления которого потребуется дополнительный проход, что в свою очередь способствует к снижению производительности. Однако данное выражение справедливо только в том случае, когда номинальный размер, указанный в УП, равен минимально допустимому пределу.

2. Рассчитываются предельно допустимые силы резания P_x и P_y (по формуле $P_{x_i} = j_{xi} \cdot \Delta x$; $P_{y_i} = j_{yi} \cdot \Delta y$);

3. Из математических моделей составляется система уравнений $\begin{cases} P_x = f(t, S, \dots) \\ P_y = f(t, S, \dots) \end{cases}$, в результате получаем формулы $t = f(P_x, P_y, \dots)$ и $S = f(t, P_y, \dots)$.

4. Проверка условий: подачи по мощности шпинделя станка (S_n) и по получаемой шероховатость поверхности (S_r).

Блок-схема алгоритма представлена в Приложении Б.

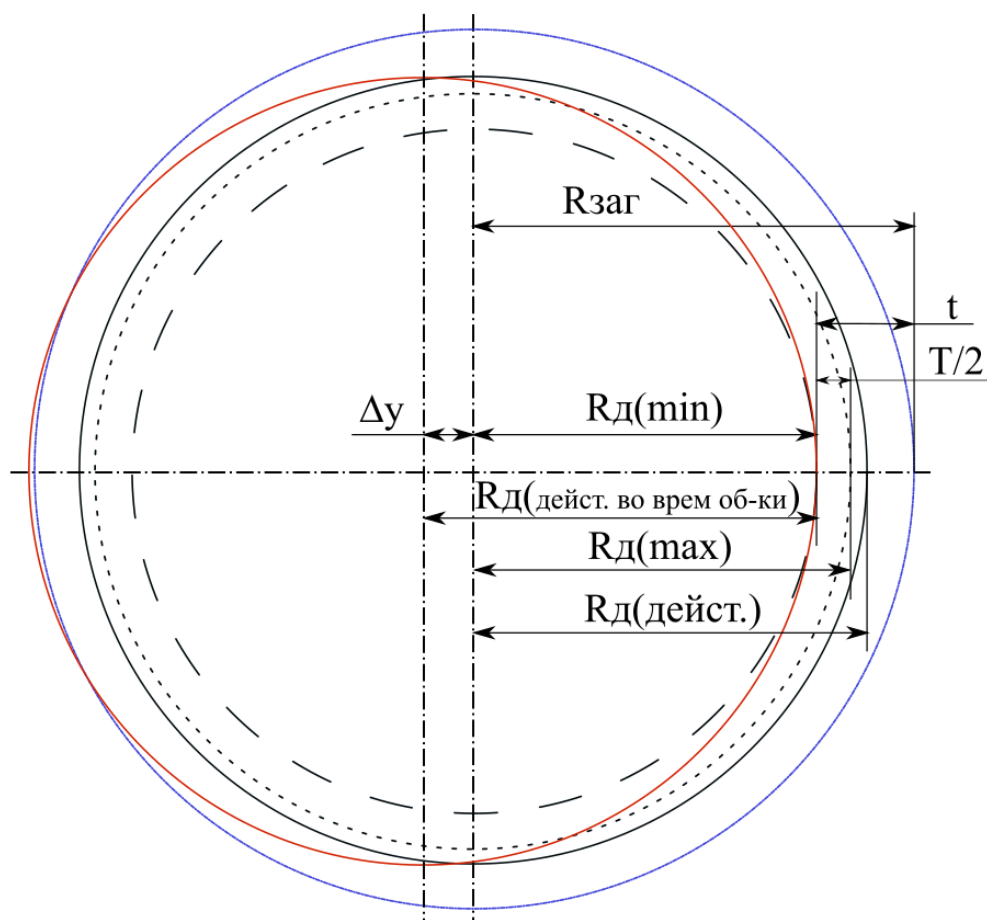


Рисунок 18 – Определение упругого перемещения по оси y

Так как режимы резания для черновой и чистовой стадий обработки отличаются, то необходимо производить расчеты и для чистовой стадии.

Для проверки выдвинутой гипотезы необходимо провести ряд экспериментов. Эксперимент производится в три этапа: 1 этап – обработка опытного образца, при подборе режимов резания по справочнику; 2 этап – обработка опытного образца, при вычислении режимов резания по разработанной методике; 3 этап – контроль линейных размеров, сравнение полученных результатов.

Выводы по главе 4

Разработана методика проектирования циклов токарной обработки, направленная на установку максимально возможных режимов резания, исходя из ограничений на подачу по мощности главного привода и требуемой шероховатости.

Методика включает в себя 3 этапа:

- 1) обработку опытного образца по режимам резания из справочников;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

- 2) обработку заготовки по рассчитанным режимам методики;
- 3) контроль заданных параметров точности и шероховатости.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		46

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ПАРАМЕТРЫ ЦИКЛА ТОЧЕНИЯ ДЛЯ СТАНКОВ С ЧПУ

В качестве примера для расчета возьмем заготовку диаметром 50 мм и длиной 100 мм. Необходимо проточить до диаметра 40 мм на расстояние от торца 20 мм. Материал заготовки – сталь 3, 30Х13, Д16Т. Для трех станков с разными жесткостями – $j_x = 30000$ Н/мм, 40000 Н/мм, 50000 Н/мм; $j_y = 20000$ Н/мм, 22500 Н/мм, 25000 Н/мм.

Подберем режимы резания по справочнику В.И. Гузеева [36].

Полученные результаты сведены в таблицу 10.

Таблица 10 – Режимы резания по справочнику

Материал	Стадия обработки	t , мм	i , число проходов	S , мм/об	n , мин ⁻¹
Д16Т	Черновая	1,3	4	0,54	1800
	Чистовая	0,7	1	0,23	1400
Сталь 3	Черновая	1,3	4	0,4	650
	Чистовая	0,7	1	0,11	1750
30Х13	Черновая	1,3	4	0,13	750
	Чистовая	0,7	1	0,07	1050

По разработанной методике рассчитаем режимы резания, а именно глубину резания и подачу (t , S). Исходные данные:

Подача, допустимая мощностью шпинделя S_N определяется по формуле:

$$S_N = \sqrt[3]{\frac{y_{P_z} \cdot 60 \cdot 102 \cdot 1000 \cdot N_{\text{шп}}}{C_{P_z} \cdot t^{x_{P_z}} \cdot K_{P_z} \cdot \pi \cdot D \cdot n'}} \quad (15)$$

где $N_{\text{шп}}$ – мощность на шпиндель станка, кВт;

C_{P_z} , x_{P_z} , y_{P_z} – коэффициент и показатели степени для составляющей силы резания P_z , в зависимости от материала заготовки и пластины (таблица 11);

Таблица 11 – Коэффициенты и показатели степени для составляющей силы резания

Марка материала	C_{P_z}	x_{P_z}	y_{P_z}
Д16Т	210	1	0,75
Сталь 3	300	1	0,75
30Х13	360	1	0,75

K_{P_z} – поправочный коэффициент, рассчитывается по формуле 16.

$$K_{P_z} = K_{M_P} \cdot K_{\varphi_P} \cdot K_{\gamma_P} \cdot K_{V_P} \cdot K_{h_P} \cdot K_{r_P}, \quad (16)$$

где K_{M_P} – поправочный коэффициент в зависимости от механических свойств обрабатываемого материала ($K_{M_P} = 1,08$);

K_{φ_P} – поправочный коэффициент на P_z в зависимости от главного угла в плане ($K_{\varphi_P} = 0,83$);

K_{γ_P} – поправочный коэффициент в зависимости от переднего угла ($K_{\gamma_P} = 1$);

K_{V_P} – поправочный коэффициент в зависимости от скорости резания ($K_{V_P} = 1$);

K_{h_P} – поправочный коэффициент в зависимости от износа резца ($K_{h_P} = 1,05$);

K_{r_P} – поправочный коэффициент в зависимости от радиуса при вершине лезвия резца ($K_{r_P} = 0,93$).

$$K_{P_z} = 1,08 \cdot 0,83 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,05 \cdot 0,93 = 0,875$$

Поддача, допустимая шероховатостью обработанной поверхности S_R рассчитывается по формуле 17:

$$S_R = \frac{C_H \cdot R_Z^Y \cdot r^U}{t_X \cdot \varphi^Z \cdot \varphi_1^{Z_1}}, \quad (17)$$

где C_H – коэффициент, характеризующий условия обработки ($C_H = 0,32$ – для стали 3 и 30Х13; $C_H = 0,67$ – для Д16Т);

R_Z – высота шероховатостей поверхности ($R_Z = 25$ мкм);

r – радиус при вершине резца ($r = 1$ мм);

Y, U, X, Z, Z_I – показатели степени ($Y = 0,8; U = 0,5; X = 0,3; Z = 0,35; Z_I = 0,33$ – для стали 3 и 30 X13; $Y = 0,8; U = 0,5; X = 0,25; Z = 0,5; Z_I = 0,42$ – для Д16Т).

Рассчитанные подачи по формулам 15 и 17 для условий обработки представлены в таблице 12. ($j_{пб}$ – жесткость передней бабки, $j_{зб}$ – жесткость задней бабки)

Таблица 12 – Режимы резания по методике

Материал	$j_{пб}$, Н/мм	$j_{зб}$, Н/мм	Стадия	t , мм	i , число проходов	S , мм/об	n , мин ⁻¹
Алюминий Д16Т	30000	20000	черновая	2,3	2	0,3	2000
			чистовая	0,7	1	0,18	2500
	40000	22500	черновая	2,45	2	0,29	2000
			чистовая	0,6	1	0,25	2500
	50000	25000	черновая	2,6	2	0,27	2000
			чистовая	0,49	1	0,26	2500
Сталь 3	30000	20000	черновая	2	3	0,3	800
			чистовая	0,6	1	0,3	1200
	40000	22500	черновая	2,2	2	0,28	800
			чистовая	0,5	1	0,33	1200
	50000	25000	черновая	2,3	2	0,26	800
			чистовая	0,4	1	0,35	1200
Сталь 30X13	30000	20000	черновая	1,3	4	0,24	700
			чистовая	0,3	1	0,38	1000
	40000	22500	черновая	1,4	4	0,24	700
			чистовая	0,25	1	0,4	1000
	50000	25000	черновая	1,5	4	0,23	700
			чистовая	0,2	1	0,42	1000

Основное время обработки рассчитывается по формуле 18:

$$T_0 = i \cdot \frac{L_0 + L_1 + L_2 + L_3}{S_0 \cdot n_{\phi}}, \quad (18)$$

где i – число проходов;

L_0 – длина обрабатываемой поверхности, мм;

L_1 – длина подвода ($L_1 = 2 \dots 5$ мм), мм;

L_2 – длина врезания, мм;

L_3 – длина перегиба, мм, $L_2 + L_3 = 3 \dots 5$ мм.

Для черновой обработки материала сталь 3:

$$T_0 (\text{чер}) = 4 \cdot \frac{20 + 2 + 4}{0,4 \cdot 650} = 0,3 \text{ мин.}$$

Для чистовой обработки:

$$T_{0 \text{ (чис)}} = \frac{20 + 2 + 4}{0,11 \cdot 1750} = 0,12 \text{ мин.}$$

Общее время обработки:

$$T_0 = 0,42 \text{ мин.}$$

И для двух других материалов расчет производится аналогичным образом.

Все полученные данные занесены в таблицу 13.

Таблица 13 – Основное время обработки (по справочнику)

Материал	Стадия обработки	T_0	$\sum T_0$
Д16Т	черновая	0,096	0,14
	чистовая	0,044	
Сталь 3	черновая	0,3	0,42
	чистовая	0,12	
30Х13	черновая	0,743	0,979
	чистовая	0,236	

Расчет времени обработки для режима резания полученные по разработанной методике производится по формуле (18). Полученные результаты представлены в таблице 14.

Таблица 14 – Основное время обработки (по методике)

Материал	$j_{пб}$, Н/мм	$j_{зб}$, Н/мм	Стадия	T_0	$\sum T_0$
Д16Т	30000	20000	черновая	0,083	0,141
			чистовая	0,057	
	40000	22500	черновая	0,09	0,131
			чистовая	0,041	
	50000	25000	черновая	0,0977	0,137
			чистовая	0,039	
Сталь 3	30000	20000	черновая	0,3186	0,389
			чистовая	0,07	
	40000	22500	черновая	0,23	0,296
			чистовая	0,066	
	50000	25000	черновая	0,246	0,308
			чистовая	0,069	
30Х13	30000	20000	черновая	0,61	0,68
			чистовая	0,069	
	40000	22500	черновая	0,622	0,686
			чистовая	0,065	
	50000	25000	черновая	0,632	0,694
			чистовая	0,062	

В таблице 15 представлен сравнительный анализ времени, рассчитанному по справочнику и по методике.

Таблица 15 – Сравнительный анализ

Материал	$j_{пб}$, Н/мм	$j_{зб}$, Н/мм	ΣT_0 , мин (по методике)	ΣT_0 , мин (по справочнику)	Эффективность, %
Алюминий Д16Т	30000	20000	0,14	0,1411	1,1
	40000	22500	0,136	0,1411	3,89
	50000	25000	0,134	0,1411	8,14
Сталь 3	30000	20000	0,39	0,4126	5,5
	40000	22500	0,31	0,4126	24,8
	50000	25000	0,29	0,4126	29,73
Сталь 30X13	30000	20000	0,686	0,979	29,9
	40000	22500	0,681	0,979	30,56
	50000	25000	0,6	0,979	31

Из сравнительного анализа видно, что по полученным расчетным данным следует, что с применением разработанной методики уменьшается основное время обработки, следовательно, повышается производительность. Однако, показатель эффективности у каждого материала заготовки свой. Так, например, для конструкционной стали (сталь 3) – 20%, для жаропрочной стали (30X13) – 30%, для алюминиевого сплава (Д16Т) – 4,3%.

Расчетная методика проектирования

Для примера проектирования цикла контурного точения, была выбрана деталь – двухступенчатый вал, представленная на рисунке 19.

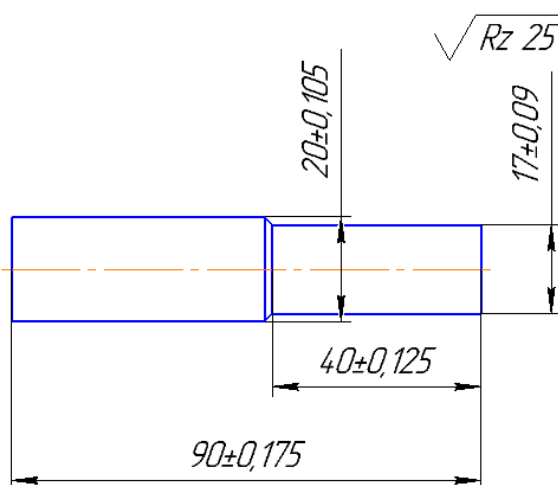


Рисунок 19 – Двухступенчатый вал

На основе полученных экспериментальных данных, были рассчитаны режимы резания по разработанной методике, получившиеся результаты представлены в таблице 16.

Исходные данные для расчета по методике:

– допустимая величина отжима: $\Delta x = 0,05$ мм; $\Delta y = 0,105$ мм;

– жесткость технологической системы: $j_{пб} = 12000$ Н/мм; $j_{зб} = 9000$ Н/мм.

Таблица 16 – Режимы резания по методике на основе экспериментальных данных

Материал	t , мм	S , мм/об	n , мин ⁻¹	i	T_0 , мин
Алюминий Д16Т	1,3	0,42	3500	5	0,24
Сталь 3	1,16	0,31	2000	5	0,56
Сталь 30X13	0,75	0,34	1200	8	1,37

Пример управляющей программы:

G90 G95 G40

G54

T0101

M4 S3500

N05 G0 Z1

N10 X26

N15 G73 U1.5 R1

N20 G73 P25 Q35 U1.5 W0.2 F0.46

N25 G1 X17

N30 Z-40

N35 X20

N40 G72 P25 Q35 F0.15 (Цикл чистового точения)

N45 Z-90

N50 G0 X100

N55 Z100

M30

										Лист
										52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Данная управляющая программа разработана для заготовки круглого сечения диаметром 25 мм из материала – Алюминий Д16Т. Также были спроектированы управляющие программы для следующих материалов – Сталь 3, Сталь 30Х13. Отличием от представленной программы является только подчеркнутые параметры режимов резания.

Также для сравнения производительности были подобраны режимы резания, по справочнику представленные в таблице 17.

Таблица 17 – Режимы резания по справочнику

Материал	t , мм	S , мм/об	n , мин ⁻¹	i	T_o , мин
Алюминий Д16Т	1	0,6	3000	6	0,23
Сталь 3	1	0,46	2000	6	0,53
Сталь 30Х13	1	0,2	1200	6	1,67

Сравнительный анализ показан в таблице 18.

Таблица 18 – Сравнительный анализ производительности

Материал	T_o , мин (по справочнику)	T_o , мин (по методике)	% эффективности
Алюминий Д16Т	0,23	0,175	23,8
Сталь 3	0,53	0,48	9,25
Сталь 30Х13	1,67	1,15	31,3

Зависимость величины жесткости от величины отжима представлена в виде графика.

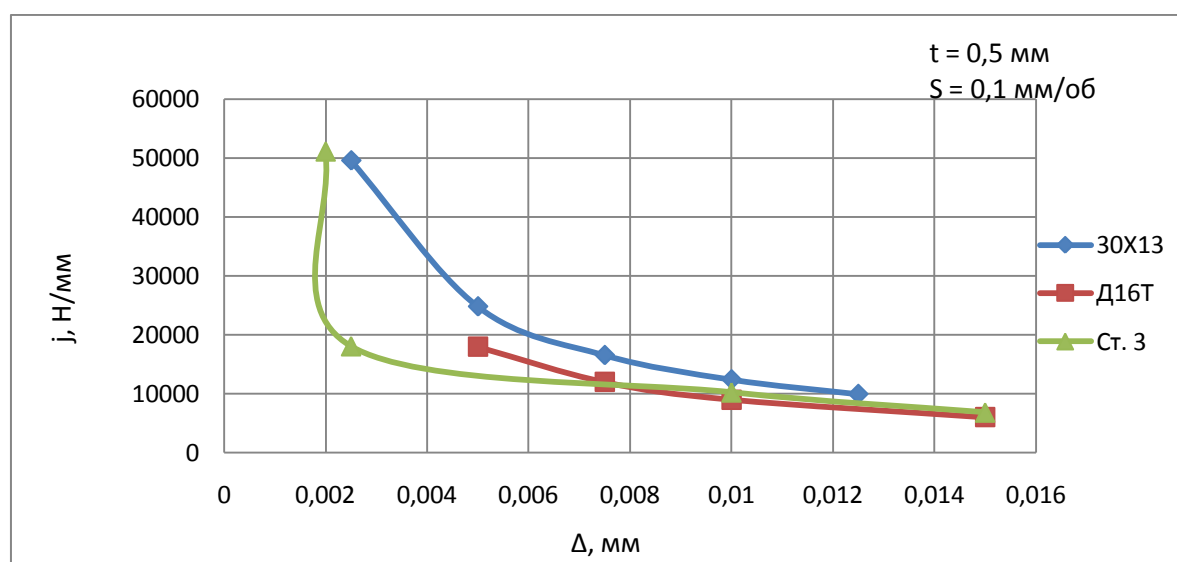


Рисунок 20 – График зависимости упругого перемещения от жесткости технологической системы

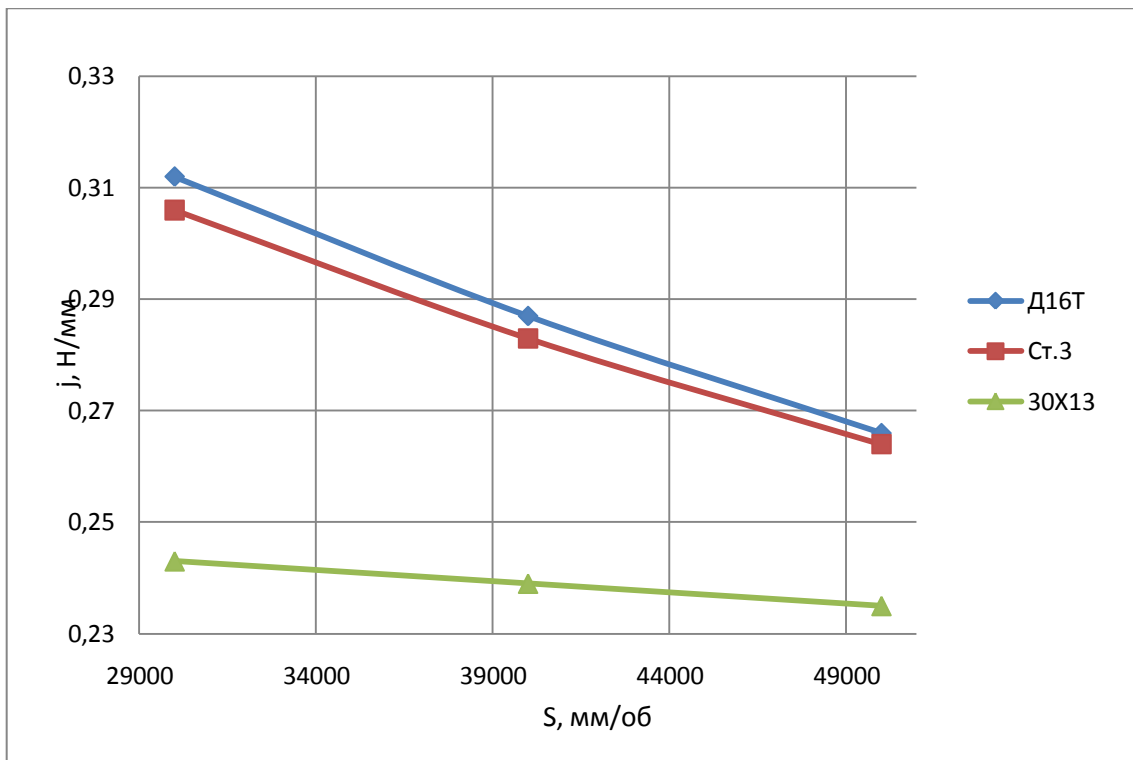


Рисунок 21 – График зависимости подачи от жесткости технологической системы

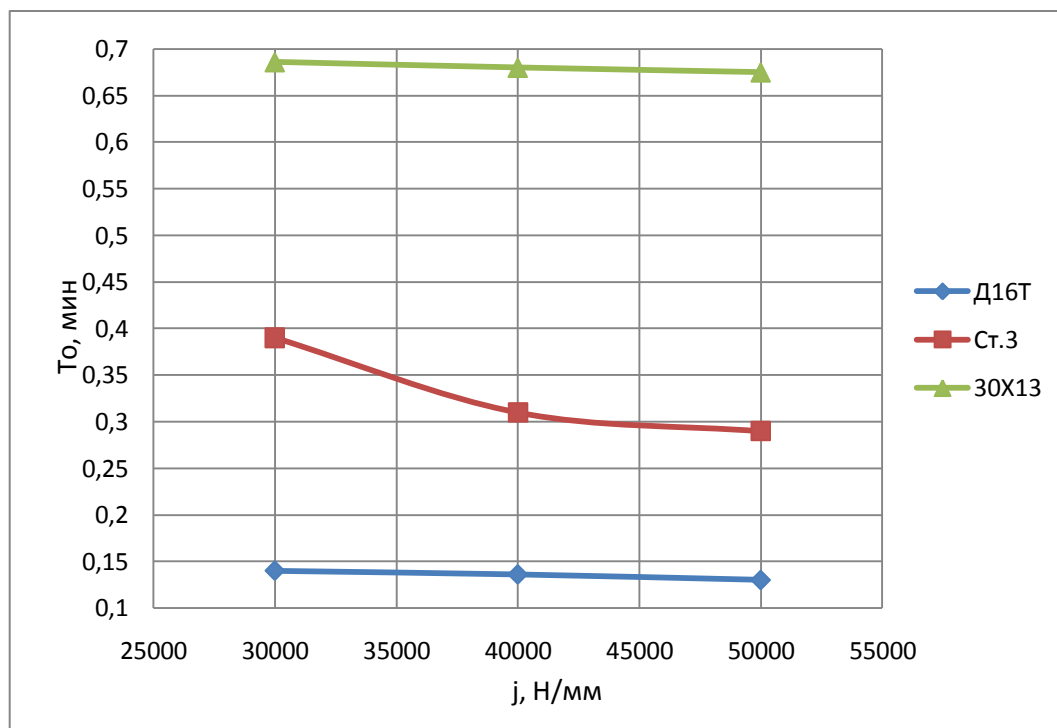


Рисунок 22 – График зависимости основного времени обработки от жесткости технологической системы

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

54

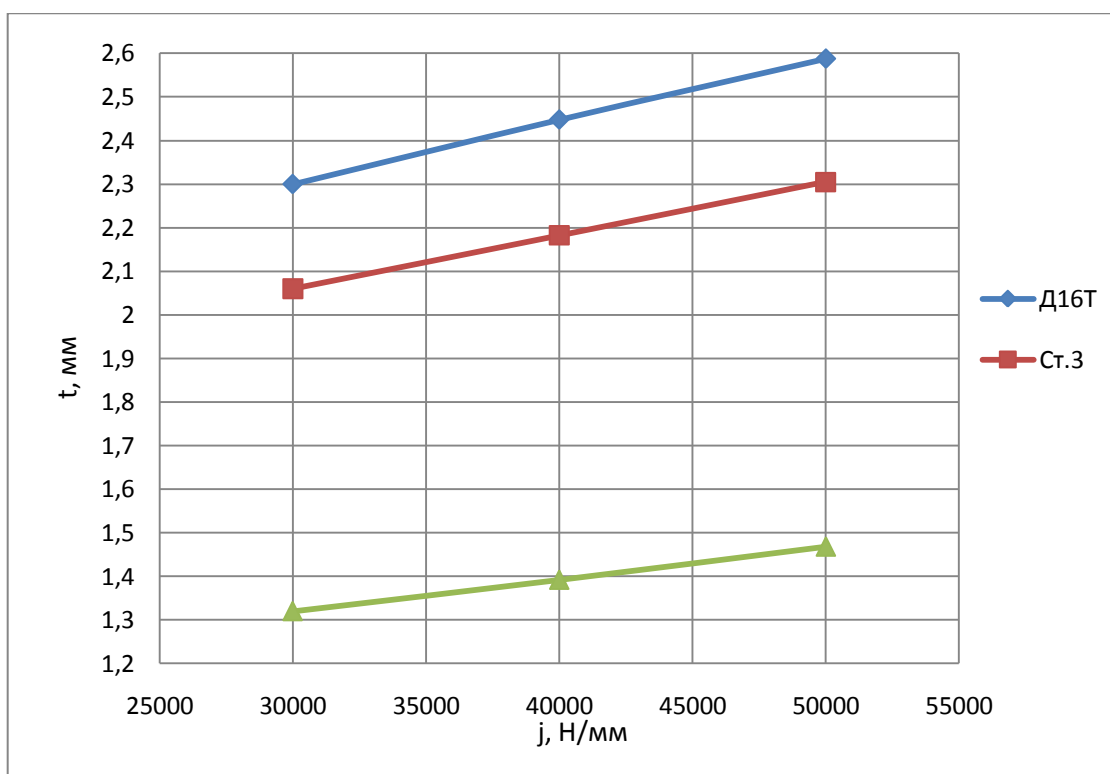


Рисунок 23 – График зависимости глубины резания от жесткости технологической системы

Выводы по главе 5

- 1) Разработана методика проектирования цикла токарной обработки для станков с ЧПУ с учетом фактических условий обработки, которая показала себя эффективной в применении;
- 2) Рассчитана эффективность применяемой методики, которая составляет для алюминия 23,8%; для стали 9,25%; для нержавеющей стали 31,3%;
- 3) Выявлена зависимость жесткости технологической системы от различных параметров.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

55

БРАСЧЕТ ОЖИДАЕМОГО ЭКОНОМИЧЕСКОГО ЭФФЕКТА

Главной целью экономического расчета является вычисление экономического эффекта от применения разработанной методики.

Для достижения поставленной цели необходимо рассчитать все затраты при разработке ВКР. Затем применяется объем производства в 100 деталей по каждому материалу и вычисляется стоимость каждой детали после применения методики. Экономический эффект за первый год рассчитывается с вычетом понесенных затрат, в последующих они не учитываются.

Предлагаемые затраты на разработку методики представлено в таблице 19.

Таблица 19 – Стоимостная оценка затрат на внедрение ВКР

Наименование	Обозначение суммы	Расчетная формула
Затраты		
1 Затраты связанные с работой станка	$Z_{т1}$	$A_0 + Z_p + Z_э$
2 Затраты на расходные материалы	$Z_{т2}$	$Z_{ти} + Z_{тз}$
Стоимостная оценка затрат		Z_t

Затраты на осуществление процесса внедрения разработанной методики находятся по формуле (19):

$$Z_t = Z_{т1} + Z_{т2}, \quad (19)$$

где $Z_{т1}$ – Затраты связанные с работой токарного станка, руб.;

$Z_{т2}$ – затраты на расходные материалы, руб.

$Z_{т1}$ находится по формуле (20):

$$Z_{т1} = A_0 + Z_p + Z_э + Z_с, \quad (20)$$

где A_0 – амортизационные отчисления оборудования, руб.;

Z_p – заработная плата рабочего, руб.;

$Z_э$ – затраты на электроэнергию, руб.;

$Z_с$ – затраты на социальные отчисления, руб.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Амортизационные отчисления по оборудованию (токарный станок с ЧПУ) находятся по формуле (21):

$$A_0 = \frac{C_0 \cdot 6,7\%}{t}, \quad (21)$$

где C_0 – цена оборудования, руб.;

t – доля года, нед.;

C_0 – цена токарного станка с ЧПУ, равная 1300000 руб.

В соответствии с формулой (21):

$$A_0 = \frac{1300000 \cdot 0,067}{24} = 3629, \text{ руб.}$$

Среднемесячная заработная плата рабочего равна 30000 руб. Станок использовался 2 недели по 2 часа в день. Оплата часа работы рабочего при восьми часовом рабочем дне пять дней в неделю равняется: $\frac{30000}{8 \cdot 5 \cdot 4} = 187,5$, руб.

$$Z_p = 187,5 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 2 = 3750, \text{ руб.}$$

Затраты на социальные отчисления находятся по формуле:

$$Z_c = Z_p \cdot 34\%, \quad (22)$$

В соответствии с формулой (22):

$$Z_c = 3750 \cdot 0,34 = 1275, \text{ руб.}$$

Затраты на электроэнергию составили 354 руб.

В соответствии с формулой (20):

$$Z_{T_1} = 3629 + 3750 + 354 + 1275 = 9008, \text{ руб.}$$

Расчет затрат на расходные материалы (Z_{T_2}), находятся по формуле:

$$Z_{T_2} = Z_{Ti} + Z_{Tz}, \quad (23)$$

где Z_{Ti} – затраты на инструмент, руб.;

Z_{Tz} – затраты на заготовки для экспериментов, руб.;

Затраты на токарные резцы (Z_{Ti}) составили 213, руб.

Затраты на заготовки для экспериментов (Z_{Tz}) составили 6845, руб.

В соответствии с формулой (23) получаем:

$$Z_{T_2} = 213 + 6845 = 7058, \text{ руб.}$$

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		57

В соответствии с формулой (19) получаем:

$$Зт = 7733 + 7058 = 14791, \text{руб.}$$

В таблице 20 представлена стоимостная оценка всех затрат на внедрение проекта.

Таблица 20 – Стоимостная оценка всех затрат на внедрение НИР

Составляющие затраты при разработке	Сумма, руб.
Затраты на инструмент	213
Затраты на заготовку	6845
Зар. плата рабочего	3750
Социальные отчисления	1275
Затраты на электроэнергию	354
Амортизационные отчисления	3629
Итого:	16066

Для расчета экономического эффекта установлен объем производства за месяц в 100 деталей типа вал, по каждому из 3 видов материала.

Средняя стоимость обработки деталей по каждому из видов материала представлена в таблице 21. Данные по стоимости предоставил отдел труда и заработной платы ОАО «ЧМЗ».

Таблица 21 – Средняя стоимость обработки деталей

Себестоимость деталей	Сумма, руб.
Средняя стоимость обработки детали из материала Алюминий Д16Т	112
Средняя стоимость обработки детали из материала Сталь 3	97
Средняя стоимость обработки детали из материала Сталь 30Х13	324

Исходя из полученных значений эффективности применяемой методики, имеется различная степень снижения стоимости обработки детали по каждому из видов материала.

В таблице 22 представлена средняя стоимость обработки деталей после применения разработанной методики.

Таблица 22 – Средняя стоимость обработки деталей после применения разработанной методики

Себестоимость деталей	Сумма, руб.
Средняя стоимость обработки детали из материала Алюминий Д16Т	85,3
Средняя стоимость обработки детали из материала Сталь 3	88
Средняя стоимость обработки детали из материала Сталь 30Х13	222,6

При расчете снижения стоимости обработки деталей использовались результаты проведенного эксперимента, которые представлены в таблице 23.

Таблица 23 – Сравнения производительности

Материал	T_o , мин (по справочнику)	T_o , мин (по методике)	% эффективности
Алюминий Д16Т	0,23	0,175	23,8
Сталь 3	0,53	0,48	9,25
Сталь 30Х13	1,67	1,15	31,3

Средняя стоимость обработки детали из материала Алюминий Д16Т (Ca_2) рассчитывается по формуле (24):

$$Ca_2 = Ca_1 \cdot \frac{100 - 23,8}{100}, \quad (24)$$

где Ca_1 – средняя стоимость обработки детали из алюминия до применения методики, руб.,

$$Ca_2 = 112 \cdot \frac{100 - 23,8}{100} = 85,3 \text{ руб.}$$

Средняя стоимость обработки детали из материала Сталь 3 (Cc_2) рассчитывается по формуле (25):

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		59

Таблица 24 – Ожидаемый экономический эффект за каждый год расчетного периода

Расчетный период (6 лет)	Сумма, руб.
2018	148 454
2019	312 974
2020	477 494
2021	642 014
2022	806 534
2023	971 054

График ожидаемого экономического эффекта показан на рисунке 24.

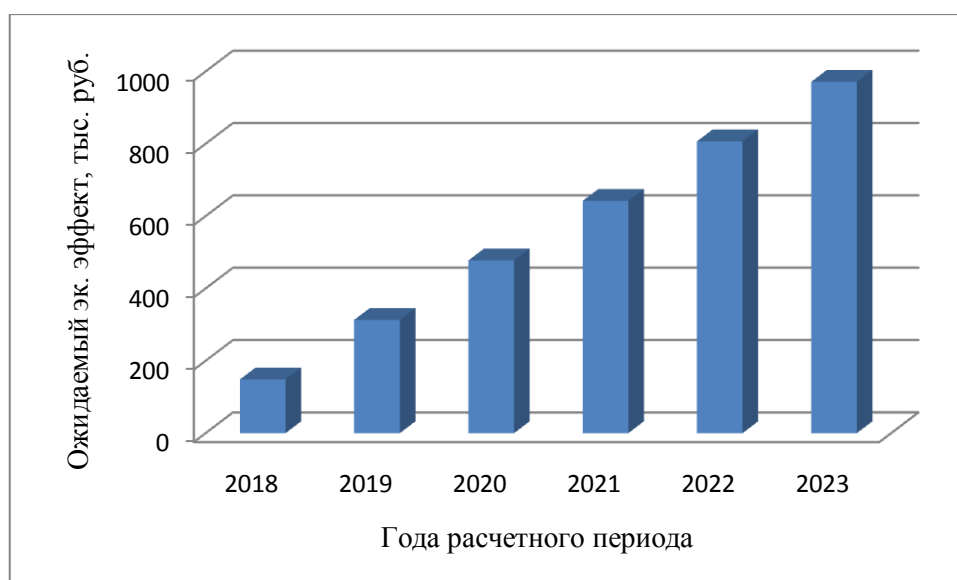


Рисунок 24 – График суммарного ожидаемого экономического эффекта за 6 лет

Расчет рентабельности разработанной методики находится по формуле:

Выводы по главе 6

Выполнен расчет ожидаемого экономического эффекта и рентабельности от результатов проекта, достигаемого за счет уменьшения себестоимости изготовления деталей. Ожидаемый экономический эффект за первый год составит 148 454 рублей, за шесть лет 971 054 рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1) Проектирование циклов точения основано на назначении режимов обработки по справочным данным. Не имеется теоретического обоснования причины выбора постоянной глубины резания и подачи.

2) Жесткость технологической системы является важным параметром, обеспечивающим точностные характеристики обработки. Предложенные решения по определению жесткости технологической системы носят преимущественно дискретный характер. Отсутствует комбинированный метод определения жесткости технологической системы.

3) Разработана методика определения жесткости технологической системы на основе производственного и расчетного метода определения жесткости технологической системы.

4) Применение разработанной методики определения жесткости технологической системы показало, что жесткость заготовки, определенной по разработанной методике имеет незначительное отличие от жесткости, определенной экспериментальным методом, а именно для Алюминия Д16Т разница составляет 7,1%, для Стали 3 составляет -6,34%, для стали 30Х13 составляет 0,22%. Применение разработанной методики возможно для любых по конфигурации и материалу заготовок.

5) Разработана методика проектирования циклов токарной обработки на станках с ЧПУ, учитывающая жесткость технологической системы.

6) По разработанной методике проектирования циклов токарной обработки были спроектированы циклы для изготовления деталей типа вал из Алюминия Д16Т, Стали 3, Стали 30Х13, повышающие производительность 23,8%, 9,25%, 31,3% .

7) Определен ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов выпускной квалификационной работы.

Применение разработанных методик определения жесткости технологиче-

									Лист
									62
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	15.04.05.2018.582.00 ПЗ				

ской системы и проектирования циклов токарной обработки на станках с ЧПУ позволяет снизить время обработки детали. Ожидаемый экономический эффект от реализации выпускной квалификационной работы ожидается в объеме: 148 454 рублей за первый год, 971 054 рублей за шесть лет.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Петрешин, Д.И. Разработка и создание самообучающейся технологической системы с адаптивным управлением параметрами качества поверхностного слоя деталей машин: дис....д-ра. тех. наук/ Д. И. Петрешин. – Брянск: ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», 2010. – 320с.

2. Гейценредер, А.А. Мониторинг состояния станочной системы токарной обработки при интеллектуальном управлении: дис.... канд. тех. наук: 15.10.01/ А.А. Гейценредер. – Ростов-на-Дону: ГОУ ВПО «Ростовский технический институт», 2006. – 214с.

3. Гришин, С.А. Применение алгоритмов самообучения к оптимизации процесса резания на примере токарной и сверлильной обработки: дис.... канд. тех. наук/ С.А. Гришин. – Тула: ГОУ ВПО «Тульский политехнический институт», 2000. – 284с.

4. Бурков, А.А. Управление технологическими системами на основе динамических и нейронно-сетевых моделей процесса резания: дис....д-ра. тех. наук: 15.10.01/ А. А. Бурков. – Комсомольск-на-Амуре: ГОУ ВПО «Амурский государственный технический институт», 2000. – 374с.

5. Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин): Учебник / Д.Н. Гаркунов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательство МСХА, 2002. – 632 с.

6. Петрешин, Д.И. Технологическое обеспечение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин на основе адаптивного управления: дис.... канд. тех. наук: 15.10.01/ Д.И. Петрешин. – Брянск: ГОУ ВПО «Брянский государственный технический университет», 2001. – 235с.

7. Таубе, А.О. Разработка метода автоматизированного выбора и коррекции скорости резания при оптимизации режимов обработки на токарных станках с ЧПУ: дис.... канд. тех. наук: 15.10.01/ А.О. Таубе. – Волгоград: ГОУ ВПО «Волгоградский политехнический институт», 2002. – 256с.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

8. Миханов, Ю.Г. Токарная обработка и точность деталей, технологическая система / Ю.Г. Миханов // Вестник машиностроения. – 1973. – №7. – С. 58 – 60.

9. Позднякова, И.В. Моделирование точности токарной обработки / И.В. Позднякова // Труды совещания по точности деталей машин. – М.: Наука, 1965. – С.142 – 150.

10. Товпенец, Е.С. Математическая модель суппорта токарного станка / Е.С. Товпенец, П.С. Сахаров // Механообработка. – 1963. – №2. – С. 36 – 42.

11. Захарченко, М.Ю. Автоматизированный контроль качества изготовления деталей при токарной обработке на основе гидроструйно-акустических методов измерения: дис.... канд. тех. наук: 15.10.01/ М.Ю. Захарченко. – Волгоград: ГОУ ВПО «Волгоградский политехнический институт», 2004. – 146с.

12. Башаров, Р. Р. Исследование процесса фрезерования концевой фрезой при высоких частотах вращения шпинделя станка / Р.Р. Башаров, Р.Г. Кудояров // Вестник УГАТУ. – 2012. № 4. – С. 71 – 77.

13. Бушуев, В. В. Направления развития мирового станкостроения / В.В. Бушуев, Ф.С. Сабиров // Вестник МГТУ «Станкин». – 2010. – С. 24 – 30.

14. Идрисова, Ю. В., Метод оперативной диагностики технического состояния приводов металлообрабатывающих станков / Ю.В. Идрисова, Р.Г. Кудояров, С.И. Фецак // Вестник УГАТУ. –2012. – № 4. – С. 113 –119.

15. Бушуев, В.В. Металлорежущие станки: учебник / В. В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 2011. – 1192 с.

16. Кошелева, А.А. Исследование динамической жесткости деталей типа тел вращения / А.А. Кошелева, Л.А. Васин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2008. – №3. – С. 120 – 129.

17. Ивахненко, Е.О. Выбор рациональных технологических режимов для обеспечения качества обработки на токарных станках / Е.О. Ивахненко, С.И. Клепиков // Сборник статей Пензенского государственного технического университета. – 1997. – С. 7 – 9.

18. Амрахов, И.Г. Метод повышения точности обработки на станках с ЧПУ

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		65

при управлении технологическим процессом / И.Г. Амрахов // Точность и производительность в механосборочном производстве. – 2015. – С. 10 –14.

19. Логинов, Р.В. Точность комбинированной обработки нежестких валов / Р.В. Логинов // Машиностроитель. – 1999. – №10. – С. 32 – 34.

20. Ивахненко, А.Г. Моделирование точности токарной обработки / А.Г. Ивахненко, О.И. Скарлыкина // Моделирование систем. – 2002. – №2. – С. 39 – 45.

21. Агафонов, В.В. Теоретическое определение центра жесткости и положения главных осей многокоординатной упругой системы станка / В.В. Агафонов // СТИН. – 2005. – №8. – С. 12 – 16.

22. Авилов, А.В. Математическая модель суппорта токарного станка / А.В. Авилов // Динамика технологических систем: Труды VIII Международной научно-технической конференции. – 2007. – С. 35 – 39.

23. Коновалов, В.В. Экспериментальные исследования виброакустических колебаний динамической системы токарного станка ПАБ-350 при различных условиях резания / В.В. Коновалов, А.А. Игнатьев, М.Ю.Захарченко // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2015. – №1. – С. 94 – 98.

24. Серков, А.С. Экспериментальные исследования статической жесткости 5-ти координатного станка с последовательной структурной несущей системы / А.С. Серков, И.С. Шлесберг, И.В. Никулевич, А.А. Мерзляков // Вестник научно-технического развития. – 2014. – №2. – С. 51 – 59.

25. Кудояров, Р.Г. Методы определения и повышения технологической жесткости токарных станков / Р.Г. Кудояров, Р.Р. Башаров, О.Д. Прыкова // Вестник УТАГУ. – 2014. – №3. С. 87 – 92.

26. Сабиров, Ф.С. Влияние технологической оснастки на динамические характеристики шпиндельного узла токарного станка / Ф.С. Сабиров, Н.А. Кочинев, С.С. Шемякин // Вестник МГТУ «Станкин». – 2015. – №4. – С. 64 – 68.

27. Утенков, В.М. Оптимизация параметров вертикальных стоек металло-режущих станков по критерию достаточной жесткости при минимальном весе /

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

В.М. Утенков // Машиностроение. – 2013. – №6. – С. 22 – 30.

28. Матрохин, М.В. Производственный способ определения жесткости узлов станков / М.В. Матрохин, Е.И. Федин, А.С. Ямников // Известие Тульского государственного университета. Технические науки. – 2012. – №12-2. – С. 126 – 131.

29. Карпушевич, З.Г. Разработка методики исследования жесткости технологической системы при токарной обработке / З.Г. Карпушевич, А.В. Трегубов // Машиноведение. – 2017. – №2. – С. 82 – 91.

30. Васин, Л.А. Способ определения жесткости станков / Л.А. Васин, С.А. Васин, Е.Н. Сержантова // Машиностроение. – 2000. – №2. – С. 189 – 194.

31. Гузеев, В.И., Математическое моделирование технологических процессов и производств: учебное пособие / В.И. Гузеев. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2015. – 102 с.

32. Кулыгин, В.Л. Технология машиностроения: учебное пособие / в 2ч. В.Л. Кулыгин, В.И. Кулыгина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Ч.1. – 93 с.

33. Кулыгин, В.Л. Технология машиностроения: учебное пособие / в 2ч. В.Л. Кулыгин, В.И. Кулыгина. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – Ч.2. – 77 с.

34. Жолобов, А.А. Станки с ЧПУ: устройство, программирование, инструментальное обеспечение и оснастка: учеб. пособие / А.А. Жолобов, Ж.А. Мрочек, А.В. Аверченков, М.В. Терехов, В.А. Шкаберин. – 2-е изд., стер. – М. : ФЛИНТА, 2014. – 355 с.

35. Переверзев, П.П. Теория и методика расчета оптимальных циклов обработки деталей на круглошлифовальных станках с программным управлением: дис....д-ра. тех. наук/ П.П. Переверзев. – Челябинск: ЮУрГУ, 1999. – 176 с.

36. Гузеев, В.И. Режимы резания для токарных и сверлильно-фрезерно-расточных станков с числовым программным управлением / В.И. Гузеев, В.А. Батуев, И.В. Сурков. – Челябинск.: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – 480 с.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

37. Авраменко, В.Е. Основы технологии машиностроения: лабораторный практикум / В.Е. Авраменко, Е.Г. Зеленкова. – Красноярск: ПИ СФУ, 2007. – 96 с.

38. Абрамов, К.Н. Основы технологии машиностроения: Методические указания к лабораторному практикуму / К.Н. Абрамов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2005. – 79 с.

39. Lianqing, Y. Stiffness analysis of machine tools using finite element method / Y. Lianqing, W. Liping // Intelligent Information Technology Applications. – 2009. – №3. – P. 553 – 556.

40. Tonoiu, S. Methodology for experimental determination of static rigidity for normal lathes / S. Tonoiu, M. Catana // Annals of DAAAM & Proceedings. – 2008. – №2. –P. 345 – 352.

					15.04.05.2018.582.00 ПЗ	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		68

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А. Алгоритм определения жесткости технологической системы

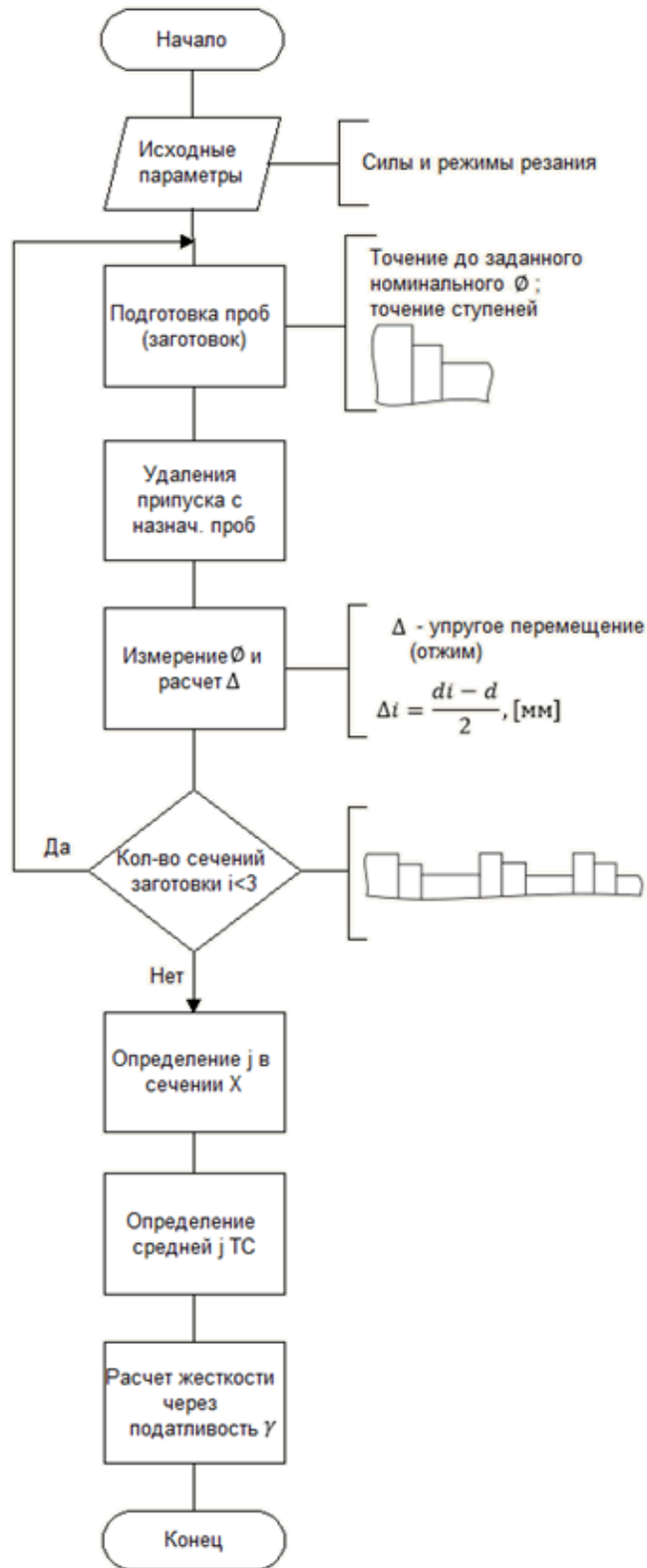


Рисунок А.1 – Алгоритм определения жесткости технологической системы

ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Алгоритм методики проектирования циклов

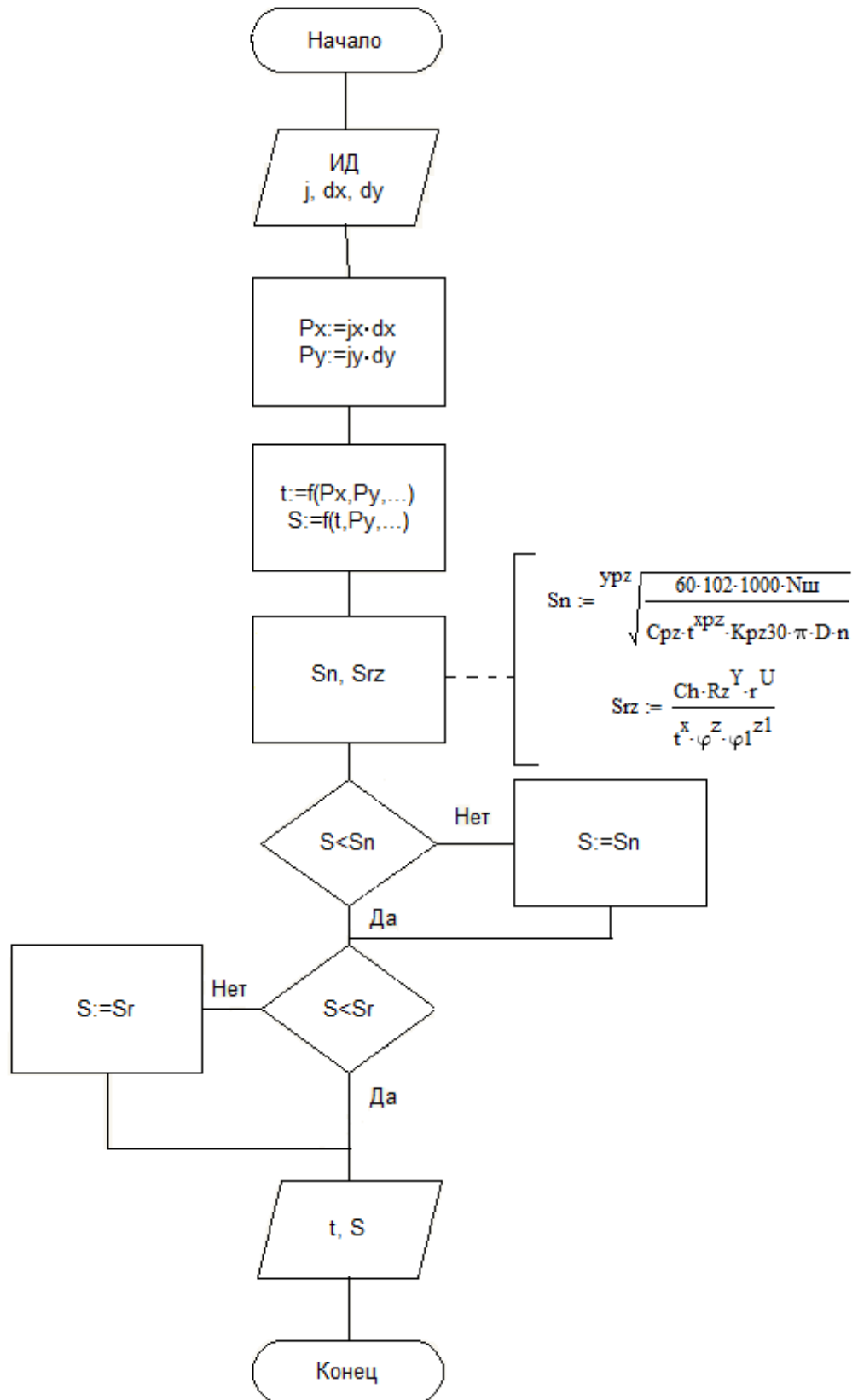


Рисунок Б.1 – Алгоритм методики проектирования циклов

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

15.04.05.2018.582.00 ПЗ

Лист

70