

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ТУЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Богомолов Максим Николаевич

**«ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ ФАСОННЫХ НЕЖЕСТКИХ
ВТУЛОК СФЕРИЧЕСКИМИ ФРЕЗАМИ»**

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Научный руководитель:

докт. техн. наук, профессор

Ямников А.С.

Тула 2022

Оглавление

Введение	5
1 Анализ действующей технологии изготовления фасонных втулок	14
1.1 Требования к точности и шероховатости.....	14
1.2 Маршрутная технология	15
1.2.1 Действующие приспособления.....	18
1.2.2 Металлорежущий инструмент	22
1.2.3 Вспомогательная технологическая оснастка и средства измерения	23
1.2.4 Используемое оборудование	24
1.3 Результаты анализа технологического процесса	24
Выводы к главе 1	26
2 Эмпирические зависимости составляющих силы резания при фрезеровании сферической фрезой.....	28
2.1 Технологические условия проведения операции фрезерования сферической фрезой фасонных впадин на втулке	28
2.1.1 Инструмент.....	28
2.1.2 Позиция фрезерования	29
2.1.3 Программа фрезерования на станке с ЧПУ	31
2.2 Сила резания при фрезеровании сферической фрезой.....	32
2.2.1 Теоретические исследования	32
2.2.2 Экспериментальные исследования.....	40
Выводы к главе 2.....	43
3 Обоснование конструктивной схемы оправки с повышенной виброустойчивостью	45
3.1 Способы повышения виброустойчивости и конструкции оправок для базирования тонкостенных втулок.....	45
3.1.1 Обзор известных решений	45
3.1.2 Предлагаемая конструктивная схема оправки повышенной виброустойчивости	50

3.2. Аналитическое описание осевого сжатия эластичных колец	52
3.2.1 Аналитическое описание осевого сжатия упругоэластичной втулки	53
3.2.2 Теория В.Д. Продана	55
3.2.3 Теория С.Н. Яковлева	56
3.2.4 Проверка полученных аналитических данных	59
3.2.5 Гипотеза о неравномерном распределении давления по длине оправки	62
3.3 Сжатие эластичного вкладыша в замкнутом объеме	64
3.3.1 Экспериментальное определение характера деформации эластичного вкладыша в замкнутом объеме	64
3.3.2 Аналитическое описание трехосного сжатия эластичных колец	71
3.3.3 Экспериментальная проверка распределения давления по длине оправки	72
3.4 Разработанная оправка для закрепления тонкостенных цилиндрических втулок	78
Выводы к главе 3	80
4 Определение деформации втулки в зажимных приспособлениях с помощью метода конечных элементов	82
4.1 Определение радиальных перемещений стенки втулки при действии осевой силы давления на упругоэластичную вставку оправки численным моделированием	82
4.2 Определение радиальных перемещений стенки оболочки при действии сосредоточенной радиальной силы	88
4.2.1 О возможности аналитического определения радиальных перемещений стенки длинной оболочки при действии сосредоточенной радиальной силы	88
4.2.2 Определение радиальных перемещений стенки втулки при действии сосредоточенной радиальной силы численным моделированием	90

Выводы к главе 4.....	96
5 Моделирование вибраций втулки	98
5.1 Определение собственных частот втулки.....	98
5.2 Определение собственных частот втулки в зажимных оправках с помощью метода конечных элементов	101
5.3 Проверка наличия резонанса	104
5.3.1 Автоколебания втулки	107
5.3.2 Автоколебания втулки, закрепленной в штатной оправке.....	107
5.3.3 Автоколебания втулки, закрепленной в разработанной оправке	107
5.3.4 Экспериментальные исследования влияния оправки с повышенной виброустойчивостью на технологическое обеспечение шероховатости поверхностей	108
Выводы к главе 5.....	110
6 Опытно-промышленные испытания разработанной технологии	111
6.1. Определение деформации втулки при закреплении на виброгасящей оправке.....	111
6.2 Исследование точности радиуса фрезерованной поверхности впадин втулки	114
6.4 Обоснование технико-экономического эффекта от применения новой технологической оснастки – виброгасящей оправки	118
Выводы к главе 6.....	119
Заключение	120
Список сокращений и условных обозначений	123
Словарь терминов	125
Список литературы	126
Приложение 1. Справочные данные.....	144

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В современном машиностроении, начавшийся подъем промышленного производства требует возрастающего выпуска прецизионных машин и механизмов. Производство таких изделий неразрывно связано с ростом объема изготовления деталей высокой точности, которые широко используются во многих отраслях промышленности.

Для повышения мобильности производства применяют станки с ЧПУ. Корпусные детали изготавливают в основном на трехкоординатных фрезерных станках, где обрабатывают плоские и фасонные поверхности, гладкие и резьбовые отверстия. Обычно конструкция корпусных деталей имеет достаточно высокую жесткость, что позволяет эффективно использовать технологические возможности станков. [19]

Для обработки деталей типа фасонных втулок требуется возможность вращений заготовки вокруг оси, поэтому приходится применять более дорогие четырехкоординатные станки, например «Фрезерный станок с ЧПУ Akira seiki performa v4 xp» стоимостью 19 800,00 \$.

Все поверхности втулки цилиндрические или плоские, кроме фасонных впадин 2 на утолщениях 1. Именно для обработки этих поверхностей с помощью сферической фрезы применяют четырехкоординатные фрезерные станки с ЧПУ, причем заготовку базируют на консольную оправку, установленную в шпиндель поворотной оси станка. Поддерживающая центровая бабка для поворотной оси станка не предусмотрена. Схема установки втулки на жесткой фрезерной оправке представлена на рисунке В.1.

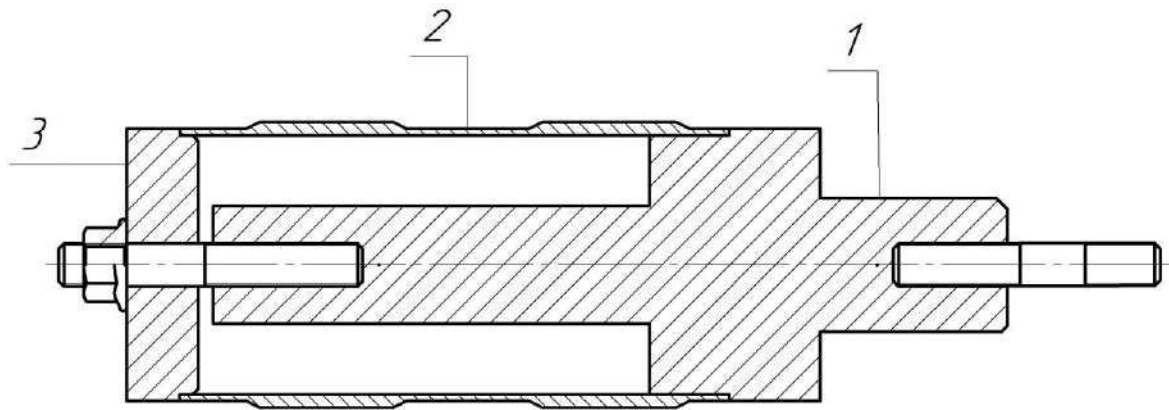


Рисунок В.1 – Схема установки втулки на жесткой фрезерной оправке для фрезерования фасонных впадин на цилиндрических утолщениях втулки:

1 – оправка, 2 – заготовка, 3- прижимная шайба

При фрезеровании на заготовку со стороны фрезы действует переменная по величине, направлению и координате точки приложения сила резания, под действием которой возникают упругие деформации технологической системы, в том числе и стенки заготовки. При совпадении частоты приложения переменной силы резания с частотой собственных колебаний технологической системы возникают вибрации, ухудшающие качество обработанной поверхности.

Степень разработанности темы

Отдельные вопросы точности при обработке тонкостенных деталей рассматривались в работах отечественных и иностранных ученых [76, 78, 81, 81, 93, 96, 111, 114.].

В некоторых случаях тонкостенные детали имеют конструктивные особенности, снижающие технологичность, например, наличие поверхностей переменной кривизны или перепады толщин стенок. Это оказывает дополнительное влияние на величину шероховатости обработанной поверхности погрешностей формы при обработке таких деталей [84, 97, 98, 109, 115-117,120].

Процесс резания материалов достаточно хорошо изучен как в России [18, 54, 70, 86, 87, 96, 99, 100, 102, 112, 115, 116]. Специалистов по резанию

обычно интересуют режимы резания и стойкость инструмента, а также влияние процесса резания на качество обработанной поверхности [18, 54, 99, 100, 102, 112]. При расчетах режимов резания обычно ограничиваются определением главной (окружной) составляющей силы резания.

В настоящее время для обработки фасонных поверхностей на станках с ЧПУ широко применяются сферические фрезы, позволяющие путем программирования траектории получать произвольные формы, не зависящие от профиля фрезы, что исключает необходимость проектирования и изготовления сложных фасонных фрез.

Для определения величины вынужденных колебаний необходимо знать величину осевой составляющей силы резания и колебания этой величины, но зависимости для определения наибольшего значения осевой (для сферической фрезы) силы резания в литературе нет. Имеются только зависимости для определения главной (окружной) составляющей силы резания [18, 21, 54, 106, 122].

Несмотря на большое количество работ по исследованию механизма срезания припуска с обрабатываемой заготовки [86-91], вопрос виброустойчивости процесса для тонкостенных оболочек до конца не решен.

Большое соотношение габаритов к толщине стенки втулки понижает её жесткость при обработке, что является дополнительным фактором, провоцирующим вибрации [48, 52, 87, 88, 91, 96, 100, 102, 109, 116, 117, 119, 120, 126, 131].

Процесс фрезерования является особо сложным ввиду наличия систематических колебаний сил резания по величине и направлению, что вызывает дополнительные к автоколебаниям вынужденные вибрации [99, 110, 114, 117].

В работах И.С. Амосова, В.К. Асташева, Л.А. Васина, С.А. Васина, В.А. Кудинова, В.П. Кузнецова, С.Л. Мурашкина Г.С. Лазарева, В.А. Скрагана. И. Глустого, И.А. Щурова, А.С. Ямникова, О. А. Ямниковой,

М.А. Galewski, К.Ж. Kalinski и других отечественных и зарубежных ученых проведен подробный обзор известных теорий возникновения колебаний, касающихся токарных операций. Изучению автоколебаний тонкостенной заготовки при ее концевом фрезеровании посвящены разработки Ю.Н. Внукова, А.И. Гермашева, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, П.А. Каморкин, И.А. Киселева, А.В. Семенюк, В.Л. Заковоротный, V.E. Gvindjiliya, S. Wu, M. Kulisz, A. Malec, I. Zagórski.

Основными теориями механизма возникновения автоколебаний при резании признаны следующие:

- линейная теория самовозбуждающихся вибраций при резании по следу обработанной поверхности (резание по следу);
- неоднозначность изменения силы резания по перемещению;
- влияние координатной связи; структурная теория автоколебаний.

Для снижения вибраций при фрезеровании подходит общепринятый метод пассивного снижения вынужденных колебаний и автоколебаний - увеличение жесткости и демпфирования инструмента или других наиболее слабых элементов технологической системы.

В этих работах ранее не изучалось резание двузубой сферической фрезой цилиндрических углублений на тонкостенных втулках. Процесс имеет свою специфику: так в справочных источниках нет зависимости для определения осевой составляющей силы резания сферической фрезой, известные способы гашения вибраций и повышения жесткости закрепленной втулки пригодны только для зажимной оправки, на которой базируется втулка при обработке. Проведенный патентный анализ показал необходимость обоснования и разработки эффективной виброгасящей оправки.

Для снижения вибраций при резании используют снижение режимов резания, повышение жесткости и демпфирующей способности технологической системы путем изменения схемы базирования и

закрепления заготовок, а также использованием инструмента повышенной виброустойчивости [48, 51, 52, 96, 110].

В действующем производстве наблюдается превышение допустимой шероховатости обработки в 8% случаев, что недопустимо много. Исходя из необходимости повышения качества фрезерования двузубой сферической концевой фрезой цилиндрических углублений на тонкостенных втулках, теоретическое и экспериментальное обоснование усовершенствованных конструкций базирующей оправки и режимов её эксплуатации для обработки поверхностей на тонкостенных фасонных втулках является **актуальной задачей**.

Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ № 20-38-90248\20 «Исследование параметров механики процессов обработки резанием заготовок тонкостенных высокопрочных оболочек, влияющих на точность и качество обработанных поверхностей». Работа соответствует направлению д): «противодействие техногенным, биогенным, социокультурным угрозам, терроризму и идеологическому экстремизму, а также киберугрозам и иным источникам опасности для общества, экономики и государства», - Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.

Объектом исследования являются технологическая операция фрезерования сферической концевой фрезой цилиндрических поверхностей на тонкостенной втулке.

Предметом исследования являются причины повышенных вибраций перехода фрезерования впадин на тонкостенных фасонных втулках.

Цели и задачи исследований

Цель работы: повышение эффективности фрезерования тонкостенных фасонных втулок на основе выявления доминирующих причин повышенных вибраций перехода фрезерования впадин на тонкостенных фасонных втулках и обоснования предложения по разработке технических решений для повышения виброустойчивости.

Задачи исследования:

1. Проанализировать современное состояние исследований в области фрезерования заготовок тонкостенных втулок, и уточнить доминирующие технологические факторы, влияющие на повышенные вибрации.
2. Выявить закономерности изменения составляющих силы резания при фрезеровании сферической фрезой фасонных поверхностей.
3. Обосновать применение упругоэластичной вставки в виброгасящих оправках для закрепления тонкостенной втулки.
4. Определить радиальные перемещения стенки обрабатываемой втулки при действии сосредоточенной радиальной силы, возникающей при заданных режимах резания.
5. Установить опасные для обрабатываемой втулки частоты колебаний для случаев: собственно втулки, как твердого тела; втулки, закрепленной в штатном приспособлении и втулки, закрепленной в разработанном приспособлении.
6. Провести экспериментально-производственные исследования спроектированного приспособления и рекомендованных сил зажима втулки.

Методология и методы диссертационного исследования

При выполнении теоретических исследований использовались положения технологии машиностроения, теории резания, теории упругости, а также обобщение опыта проектирования и эксплуатации известных конструкций виброгасящих оправок.

Распределение давления в упругоэластичной вставке оправки для различных видов нагружения исследовалось аналитически и экспериментально.

Для определения собственных частот колебания обрабатываемой втулки и величин упругих деформаций применено численное моделирование в среде SolidWorks.

Экспериментальные исследования проводились на физических моделях и реальных образцах.

Экспериментальной базой исследований являются действующие технологические процессы производства втулок на АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева», поверенные универсальные измерительные приборы, используемые в АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева».

Положения, выносимые на защиту:

- выявленные основные источники возникновения вибраций при фрезеровании тонкостенных втулок,
- разработанная картина резания и схема расчета параметров слоя, срезаемого сферической фрезой; а также зависимости составляющих силы резания, выраженные в виде определенного интеграла по углу между точкой пересечения режущей кромки фрезы с её осью и точкой пересечения кромки с обрабатываемой поверхностью,
- теоретическое и экспериментальное обоснование эффективности применения упругоэластичной вставки в виброгасящих оправках,
- результаты численного моделирования упругих деформаций втулки зажатой в штатной, а также в виброгасящей оправке, под действием сил зажима и радиальной составляющей силы резания,
- результаты численного моделирования собственных частот втулки в свободном состоянии и зажатой в штатной, а также в виброгасящей оправке,
- результаты внедрения операции фрезерования втулки, закрепленной на виброустойчивой оправке, в действующем технологическом процессе.

Научная новизна - аналитически и экспериментально обоснованы конструктивные и эксплуатационные параметры оправки с упругоэластичной вставкой, обеспечивающие повышение виброустойчивости и точности при фрезеровании фасонных впадин на тонкостенной втулке сферическими фрезами.

Теоретическая значимость работы заключается в дополнении теоретических основ технологии машиностроения в части обеспечения точности и качества механической обработки применительно к классу тонкостенных втулок.

Практическая значимость работы. Обоснована, разработана и запатентована компоновка позиции с повышенной жесткостью и демпфирующей способностью технологической системы с новой конструкцией оправки. Даны рекомендации по режимам эксплуатации оправки (силе осевого давления на сжимаемую упругоэластичную вставку) для обеспечения заданной шероховатости обрабатываемых поверхностей. Технологические рекомендации, разработанные на основании исследований, приняты к внедрению на АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева». Ожидаемый экономический эффект составит 9 018 400 рублей в год.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Диссертационная работа представляет собой **обоснование новых технологических решений**, обеспечивающих заданное качество обработки, и снижающих трудоемкость фрезерования сферической фрезой цилиндрических поверхностей на тонкостенной втулке.

Содержание исследований соответствует специальности 2.5.6 «Технология машиностроения». Область исследования: №2 (технологические процессы, операции, установки, позиции, технологические переходы и рабочие ходы, обеспечивающие повышение качества изделий).

Степень достоверности и апробацию результатов

Степень достоверности. Экспериментальные исследования произведены в производственных условиях на АО «НПО «СПЛАВ» имени А.Н. Ганичева» с применением аттестованных измерительных средств. Теоретические расчеты подтверждены экспериментальными результатами.

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на Всероссийских конференциях таких как: ДТС2020 в городе

Ростов-на-Дону, Всероссийской (национальной) НПК молодых ученых в г. Тюмень, в конференциях с международным участием и международных симпозиумах, а также на ежегодных НТК преподавателей и сотрудников ТулГУ в 2018-2022 г.

Публикации результатов работы. По материалам диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 12 статей в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ, из них 6 статей, входящие в международную систему цитирования Scopus.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из: введения; шести глав; заключения; списка сокращений и условных обозначений; словаря терминов; списка литературы; приложений, в которых содержится информация о физико-механических характеристиках материалов, используемых в настоящей работе, часть кода управляющей программы для станков с ЧПУ, акт внедрения разработанной оправки, сертификат на патент. Основная часть работы изложена на 149 страницах, содержит 80 рисунков, 25 таблиц. Список использованных источников включает 136 наименований.

1 АНАЛИЗ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФАСОННЫХ ВТУЛОК

1.1 Требования к точности и шероховатости

В общем машиностроении широко применяют легкие сплавы и высокопрочные армированные пластики типа углепласта и тому подобных материалов. Однако не менее широко применяют черные металлы, в частности углеродистые стали, например, сталь 30, обладающую хорошими прокаливаемостью, прочностью и дешевизной.

Втулка является типовой для машиностроения. Анализируемая втулка (рис. 1.1) представляет собой тонкостенный цилиндр с толщиной стенки 2,5 мм. На верхней поверхности находятся две ступени 1, в которых необходимо сделать 8 фасонных впадин 2 с радиусом $R_{\max} 20$. При этом к поверхности 2 требования шероховатости $Ra 6,3$ и отклонение от цилиндричности 0,1 мм. [77].

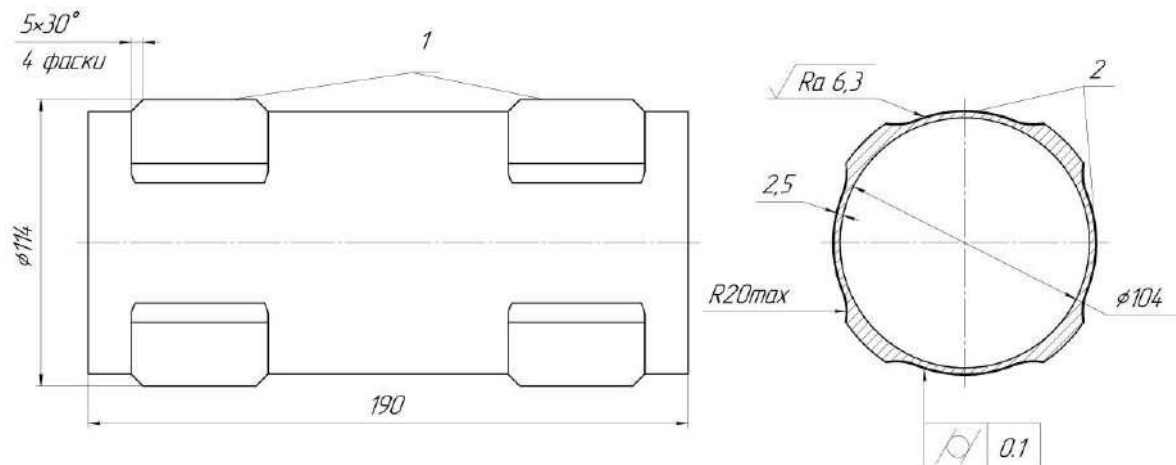


Рисунок 1.1 – Эскиз фасонной втулки

Так как втулка обрабатывается преимущественно на станке с ЧПУ, то для получения высокой точности обработки и форм поверхностей необходимо максимально сократить количество переустановов при

обработке. В этом случае поверхности, которые требуют точности взаимного расположения, обрабатывают за один установ.

1.2 Маршрутная технология

Рассматривается изготовление втулки (Рис. 1.1). В качестве заготовки принята труба из стали 30 ГОСТ 1050-2013 [2]. Перед фрезерной обработкой, втулка проходит пилоотрезную операцию, черновую токарную обработку, прессовую операцию (Табл. 1.1).

Таблица 1.1 - Технологический процесс предварительной механической обработки фасонной втулки.

№	Наименование операции	Содержание операции	Оснастка
005	Пилоотрезная	1. Отрезать заготовку, выдерживая размер 195. ₂	Автоматический ленточнопильный станок BMSO 320
010	Токарная	1. Установить, закрепить, раскрепить снять заготовку. 2. Точить поверхность, выдерживая размеры 194. ₁ . 3. Точить поверхность, выдерживая размеры 193. ₁	Токарный станок с ЧПУ TAKISAWA. PCLNR2020K12HP державка; CNMX1204 A1-SM пластина черновая.
015	Прессовая	Прямое выдавливание заготовки, с выдерживанием размеров Ø116 и Ø 102.	Пресс гидравлический П6328. РИ 01.00.000 Вытяжной штамп.
020	Отжиг	Типовой технологический процесс ОГМет	

Первые операции являются подготовительными. На них получают исходную втулку для последующей механической обработки. На токарной операции подрезают торцы для надежного базирования на прессовой операции, на которой уменьшают диаметральные размеры втулки, вследствие отсутствия необходимого сортамента горячекатаных труб (Рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Штамповая оснастка

На рис. 1.3 представлен внешний вид втулки после выдавливания и отжига. Твердость конечной заготовки равна HB 285...325.



Рисунок 1.3 - Фотография внешнего вида втулки после выдавливания и отжига

Затем приступают к формообразованию поверхностей втулки, заданных чертежом (Табл. 1.1 – Продолжение).

Таблица 1.1 - Продолжение

025	Токарная	<p>1. Установить, закрепить, раскрепить снять деталь.</p> <p>2. Точить поверхность, выдерживая размер $191_{-0,5}$.</p> <p>3. Расточить поверхность, выдерживая размер $\varnothing 104^{+0,15}$.</p> <p>4. Точить поверхность, выдерживая размер $190_{-0,5}$.</p> <p>5. Точить поверхность, выдерживая размеры $\varnothing 109_{-0,2}$; $\varnothing 119_{-0,2}$.</p>	<p>Токарный станок с ЧПУ TAKISAWA.</p> <p>OP-210 Патрон 3-х кулачковый П 01.00.000 кулачки с накладками;</p> <p>П 02.00.000 кулачки с накладками;</p> <p>51.2-2020-21М резцедержатель; PCLNR2020K12HP державка; CNMX1204 A1-SM пластина черновая;</p> <p>CNMG1204 04WF пластина чистовая;</p> <p>C4-R C2080-59110A резцедержатель; C4-PCLNR-13080-09M1 державка; CNMM 120412-WR пластина черновая CNMG 120404-WL пластина чистовая</p>
030	Фрезерная	<p>1. Фрезеровать восемь фасонных впадин, выдерживая размер 2,5 с радиусом $R_{\max} 15_{-1}$ и выдерживая угол 90°.</p>	<p>Фрезерный станок с ЧПУ Akira Seiki Performa V4</p> <p>П 03.00.000 приспособление специальное.</p> <p>BT40-KCH32-135 Фрезерный патрон BT;</p> <p>BCF3028S32-160 Сферическая корпусная фреза со сменными режущими пластинами BCF; ZCET150CE/SE пластина;</p> <p>СИ 01.00.000 калибр на фасонные впадины.</p>

1.2.1 Действующие приспособления

На токарной операции производят подрезку торцов и растачивание при закреплении в трехкулачковом самоцентрирующем патроне с удлиненными широкими кулачками, расточенными по среднему диаметру базовой поверхности втулки (Рис. 1.4).

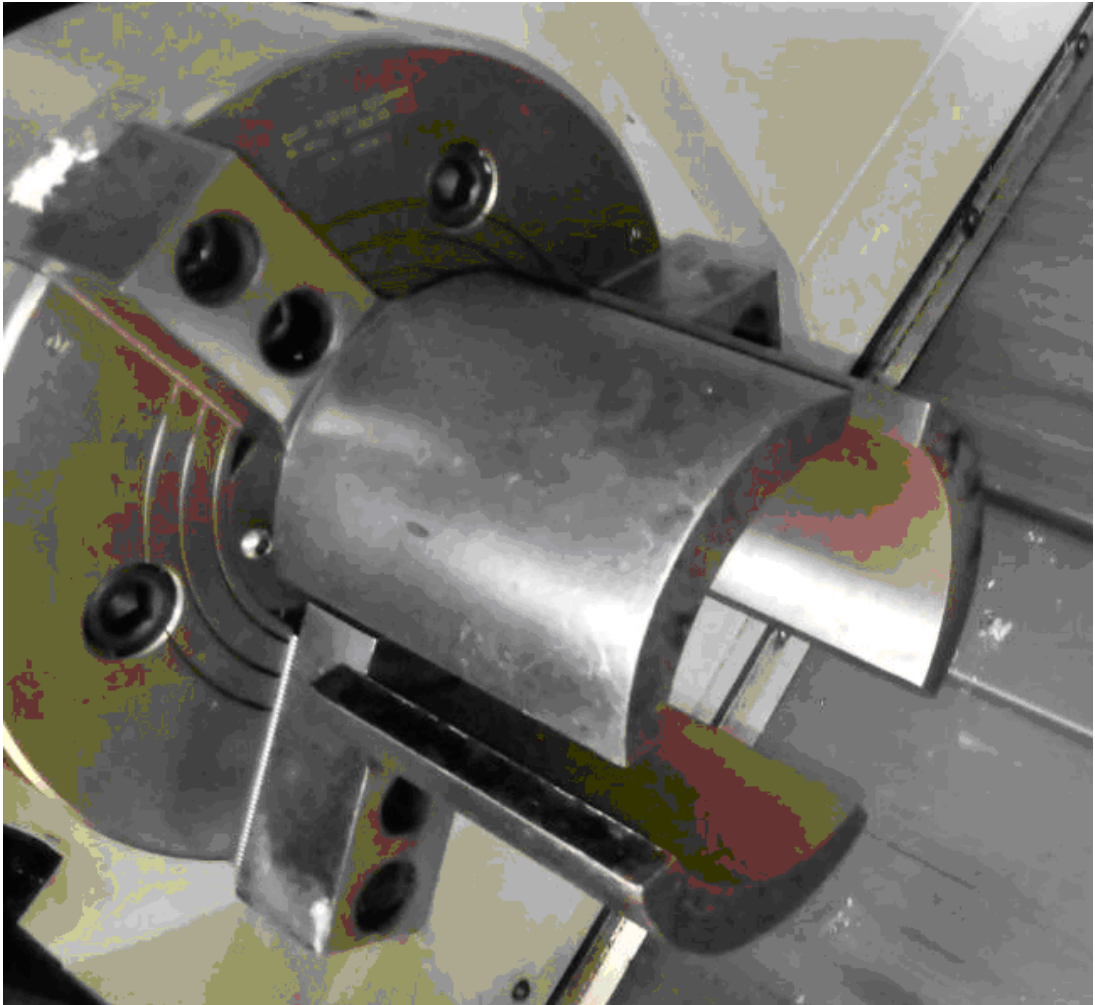


Рисунок 1.4 - Трехкулачковый самоцентрирующий патрон с удлиненными широкими кулачками для растачивания внутренней поверхности

Аналогичный патрон с зеркально выполненными кулачками применяют на подрезке торца с другой стороны и точении наружной поверхности втулки (Рис. 1.5).

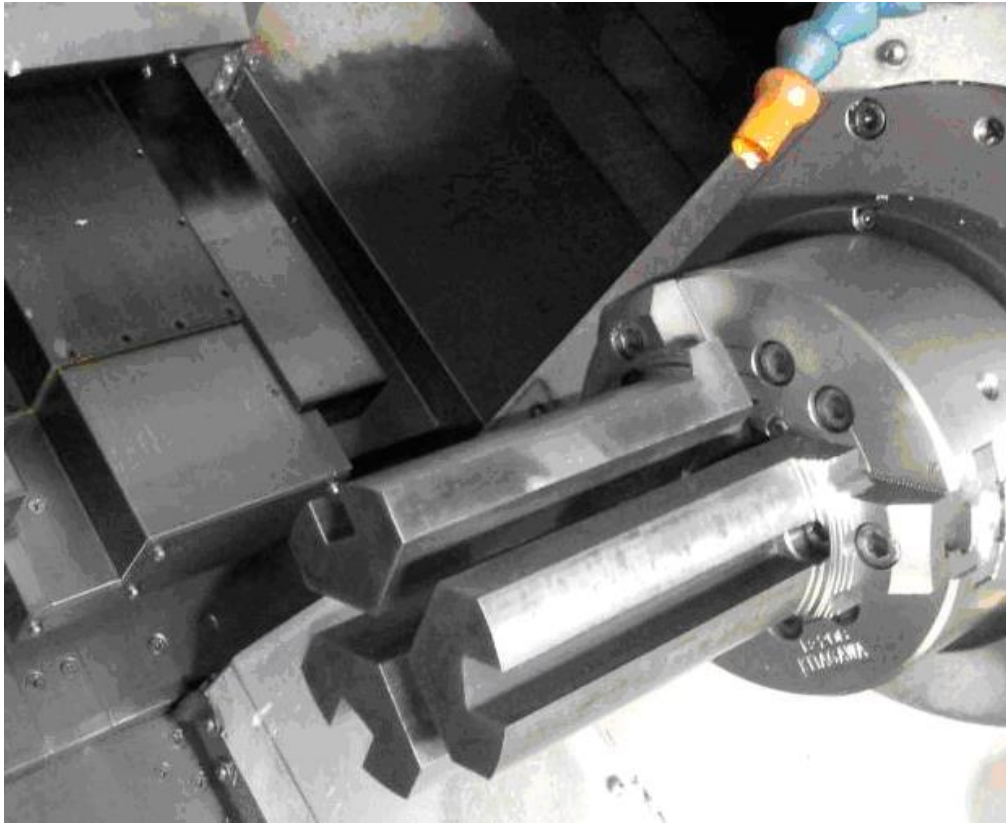


Рисунок 1.5 - Трехкулачковый самоцентрирующий патрон с удлиненными широкими кулачками для обработки наружной поверхности

В настоящее время для фрезерования фасонных впадин на цилиндрических утолщениях втулки на предприятии используется оправка, состоящая из вала – 1, и прижимной крышки – 2 (рис. 1.6).

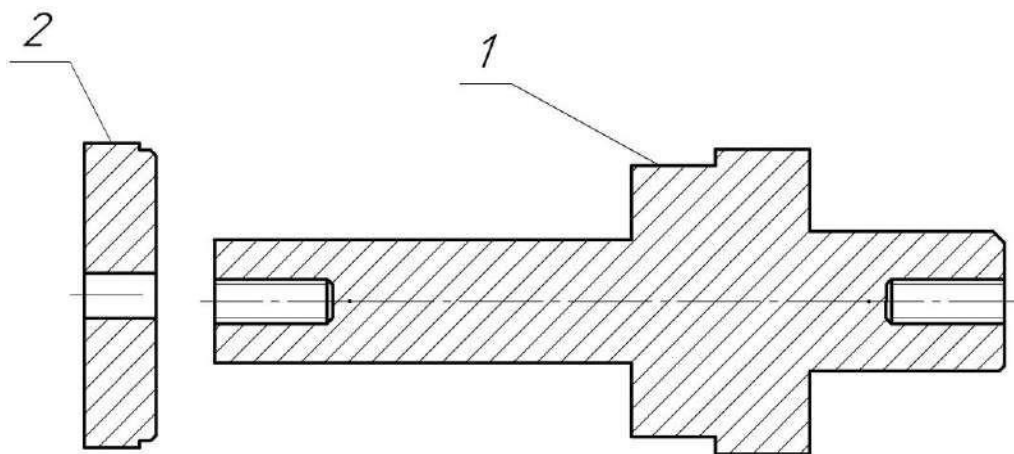


Рисунок 1.6 - Оправка для фрезерования фасонных впадин на цилиндрических утолщениях втулки

Схема базирования податливых сложнопрофильных втулок на операции фрезерования впадин на оправе, показанной на рис. 1.6, представлена на рис. 1.7.

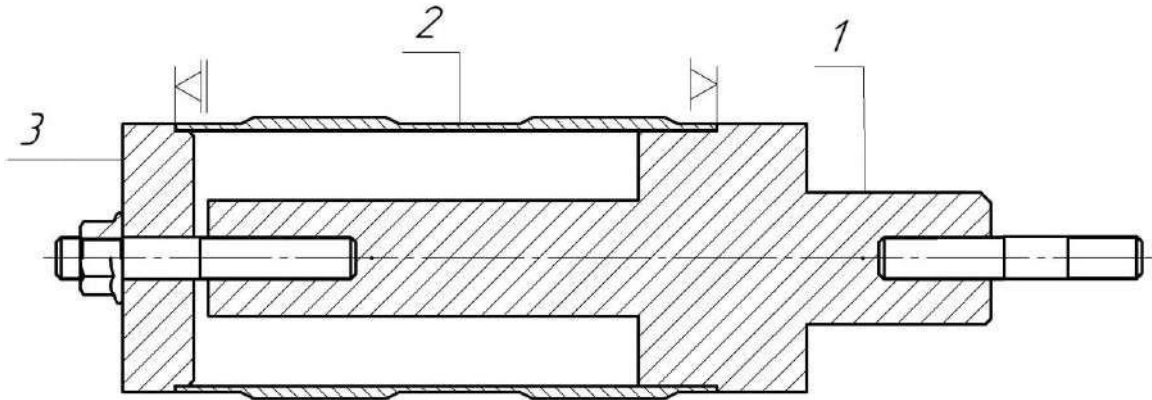


Рисунок 1.7 - Схема базирования податливых сложнопрофильных втулок на операции фрезерования впадин

Правая часть втулки центрируется по посадочной цилиндрической поверхности корпуса, это дает 2 условные базовые точки, и по торцу, что дает 3 условные базовые точки. Последней степени свободы – возможности поворачиваться вокруг собственной оси, втулки лишается воздействием осевая сила зажима - Q_a , создающей на опорной плоскости момент трения $M_{тр} = R Q_a$, где R – средний радиус опорной поверхности втулки.

Корпус оправки - 1 крепится к четвертой, поворотной оси станка, с помощью шпильки. Обрабатываемая втулка - 2 устанавливается на цилиндрическую поверхность корпуса оправки – 1 и упирается в торец. Другой торец втулки фиксируется прижимной шайбой – 3, на которую воздействует гайка, навинчиваемая на крепежную шпильку.

Предполагается, что сила зажима, развиваемая гайкой, должна удовлетворять условиям:

$$\begin{cases} Q_a > P_z + P_x, \\ Q_a f R_{bs} > R_w (P_z + P_x) \end{cases}$$

где Q_a – осевая сила зажима,

f – коэффициент трения втулки о торцовую плоскость оправки,

R_{bs} – радиус приложения силы зажима к втулке (bs : от base surface – базовая поверхность),

R_w – радиус контакта к втулке с торцовой плоскостью оправки (w : от work piece – заготовка),

P_z – окружная составляющая силы резания,

P_x – составляющая силы резания, направленная вдоль оси втулки.

Недостатком такой оправки является то, что центральная часть стенки втулки не имеет поддержки, поэтому во время фрезерования, под действием систематически меняющихся сил резания, возникают автоколебания, ведущие к ухудшению качества поверхности.

Левая часть втулки также не имеет поддержки, что предполагает не только возникновение вибраций, но и увеличенные отжимы втулки от инструмента под действием силы резания и изменения координаты приложения этих сил.

1.2.2 Металлорежущий инструмент

Анализ технологического процесса произведен по нескольким критериям:

- по типам и количеству типоразмеров инструментов,
- по степени унификации и стандартизации сменных многогранных пластин, цельные и т.п.) и т.д.

Результаты анализа занесены в таблицу 1.2

Таблица 1.2 – Металлорежущий инструмент

№	Инструмент	Стандарт	Наименование
1	Дорн, вытяжной штамп	Специальный	ПИ 01.00.000
2	Резцедержатель	Sandvik Coromant	51.2-2020-21M C4-R C2080- 59110A
3	Державка	Sandvik Coromant	PCLNR2020K12HP C4-PCLNR-13080- 09M1
4	Твердосплавная пластина	Sandvik Coromant Hitachi	CNMX1204 A1-SM CNMG1204 04WF CNMM 120412-WR CNMG 120404-WR ZCET150CE/SE
5	Сферическая корпусная фреза со сменными режущими пластинами BCF	RBH	BCF3028S32-160

Из таблицы 1.2 видно, в основном применяют покупной инструмент ведущих инструментальных фирм, что оправдано с технико-экономической позиции.

1.2.3 Вспомогательная технологическая оснастка и средства измерения

Средства измерений при проведении анализа систематизированы по конструктивным признакам.

Для контроля заданной точности обработки используются как стандартные, так и специальные измерительные инструменты: калибры, скобы, образцы шероховатости.

1.2.4 Используемое оборудование

На операции вытяжки применяют пресс гидравлический одностоечный правильно - запрессовочный П6328.

Фрезерный станок с ЧПУ Akira seiki performa v4 xp подходит для обработки заготовок сложной формы и разных габаритов. Станок оснащён направляющими качения. Основными особенностями таких направляющих являются высокая точность (отклонения в геометрии хода — в пределах 5 мкм), жёсткость и плавность работы [134].

Из анализа технологического процесса по используемому оборудованию можно сделать следующие выводы: металлообрабатывающее оборудование по своим техническим характеристикам подходит для производства исследуемой втулки, обеспечивает выполнение заданной точности и экономичности обработки.

1.3 Результаты анализа технологического процесса

Токарная операция не вызывала технологических затруднений: технологической базой являлась длинная цилиндрическая поверхность, реализуемая длинными кулачками, зажимная поверхность которых выполнена по среднему диаметру базовой поверхности, и торцовая поверхность, упирающаяся в ступени кулачков патрона. Процесс точения не вызывал значимых вибраций и шероховатость обработанной поверхности соответствовала заданной величине.

Сложнее обстояло дело с фрезерованием фасонных впадин на цилиндрических утолщениях втулки. Обработанная поверхность имела явные признаки вибраций (Рис. 1.8).

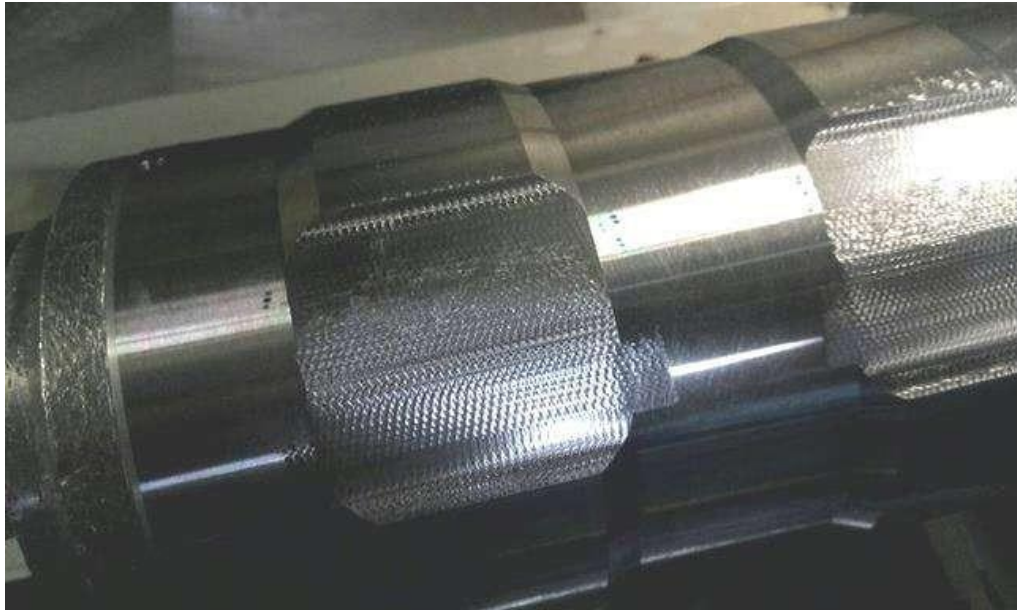


Рисунок 1.8 - Обработанная поверхность со следами вибраций

Качество поверхностей измеряли с помощью профилометр «Hommel-atomic w5» [129] на каждом участке в пяти точках (Табл. 1.3).

Таблица 1.3 - Средние и максимальные значения шероховатости поверхностей для втулки, расположенной на действующей оправке

Шероховатость поверхности Ra, мкм		
Поверхность 1	Поверхность 2	Поверхность 3
9.76 /12.4	6.66 /7.6	6.62 /7.5

Как видно из табл. 1.3, при фрезеровании на действующей оправке не удается достичь удовлетворительных параметров качества: максимальное значение Ra в зоне 1 составляет 12,4 мкм, что превышает допустимое значение Ra 6,3. На поверхностях 2 и 3 средняя величина на измеряемой поверхности также превышает допустимое значение Ra 6,3, а максимальное значение доходит до Ra 7,6.

Снижение режимов резания производят в основном путем уменьшения подачи, однако этот путь в данном случае неприемлем, так как снижается заданная производительность. Кроме того, при значительном снижении

подачи толщина срезаемого слоя может достичь критического значения, при котором резание прекращается [75].

Ввиду незначительных габаритов фрезы и ее приспособленность для эксплуатации на станках с ЧПУ, модернизация конструкции фрезы путем повышения ее демпфирующих способностей невозможна [25, 27, 52, 75].

Снижение скорости подачи является наиболее распространенным способом снижения скорости резания. В данном конкретном случае это было неприемлемо из-за присущей ему потери производительности. Кроме того, при резком уменьшении подачи толщина стружки может достигать критического предела при остановке резания [75]. Поскольку фреза была компактной и специально предназначенной для станков с ЧПУ, модифицировать ее для повышения демпфирующей способности было невозможно [95, 96, 101, 104].

Единственной возможностью повысить жесткость и виброустойчивость закрепленной втулки, признана оптимизация схемы базирования и улучшение конструкции установочной оправки.

Выводы к главе 1

1. Анализ базового технологического процесса изготовления втулки показал:

- Технологический процесс изготовления данной втулки соответствует условиям серийного производства, включает в себя прогрессивное оборудование с ПУ.

- При производстве изделий применяется универсальная измерительная оснастка, универсальные средства

- Технологический процесс налажен: параметры, заложенные в технологическом процессе, выполнены, в основном, в пределах допусков.

2. В процессе обработки наблюдаются вибрации, которые ухудшают качество обработанной поверхности на неподкрепленном конце втулки,

выводя значения шероховатости за пределы установленных значений в $1,5 \div 1,7$ раза, что неприемлемо.

3. Естественной причиной, вызывающей колебания втулки, является переменный характер изменения сил резания по времени. Как и при всяком фрезеровании, толщина срезаемого слоя металла от нуля увеличивается до максимума, а затем снова падает до нуля. Частота вынужденных колебаний связана с частотой вращения инструмента и количества режущих зубьев.

4. Анализ схемы базирования и закрепления втулки на фрезерной операции показывает, что наиболее очевидной причиной возникновения вибраций является недостаточная жесткость неподкрепленного конца втулки и отсутствие каких-либо демпфирующих виброгасящих элементов.

5. Аналитические исследования литературных источников показывают, что следует применять модернизацию схемы базирования и конструкции установочной оправки.

2 ЭМПИРИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ СОСТАВЛЯЮЩИХ СИЛЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ СФЕРИЧЕСКОЙ ФРЕЗОЙ

2.1 Технологические условия проведения операции фрезерования сферической фрезой фасонных впадин на втулке

2.1.1 Инструмент

Обработка фасонной поверхности осуществляется сферической фрезой со сменными пластинами. В серийном производстве принят вариант формообразования фасонной поверхности втулки фрезерованием сферической корпусной фрезой RVH VCF3028S32-160 со сменными пластинами ZCET 150CE диаметром 32 мм (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 - Фреза сферическая со сменными пластинами по металлу

Выбраны сферические фрезы со сменными пластинами, исходя из эксплуатационных соображений:

- замена изношенных пластинок осуществляется чрезвычайно просто;
- для формообразования любой сложной поверхности удобно составлять программу для станка с ЧПУ.

В нашем случае применяют 4-х координатный станок с ЧПУ “Akira seiki performa v4 xp” (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 - Сферическая корпусная фреза RVH BCF3028S32-160 со сменными пластинами ZCET 150CE на 4-х координатном станке с ЧПУ “Akira seiki performa v4 xp”

2.1.2 Позиция фрезерования

Приняты режимы резания: на врезании скорость резания $V = 282,6$ м/мин, частота вращения фрезы $n = 3000$ мин⁻¹, подача

$S_{\text{мин}} = 450$ мм/мин, глубина резания $t = 2,5$ мм, ширина фрезерования $B = 3$ мм. При дальнейшем фрезеровании $V = 282,6$ м/мин, $n = 3000$ мин⁻¹, $S_{\text{мин}} = 3000$ мм/мин, $t = 2,5$ мм, $B = 0,4$ мм.

Следует сделать замечание: режущий инструмент работает не на рациональных режимах резания, вследствие необходимости выполнения увеличенной программы производства и отсутствия дополнительного оборудования.

В качестве заготовки использовали отрезок трубы 121x7 ГОСТ 8732-78 из стали 30 ГОСТ 1050-88. Втулку устанавливали с зазором на жесткую оправку, закрепленную в делительной головке 4-ой поворотной оси станка. Зажим производили с помощью шайбы, шпильки, ввинченной в жесткую оправку, и гайки (см. рис. 1.6-1.8). Во втулку заглубили фрезу полным радиусом на глубину 4,21 мм и ширину 13,72 мм (Рис. 2.3).

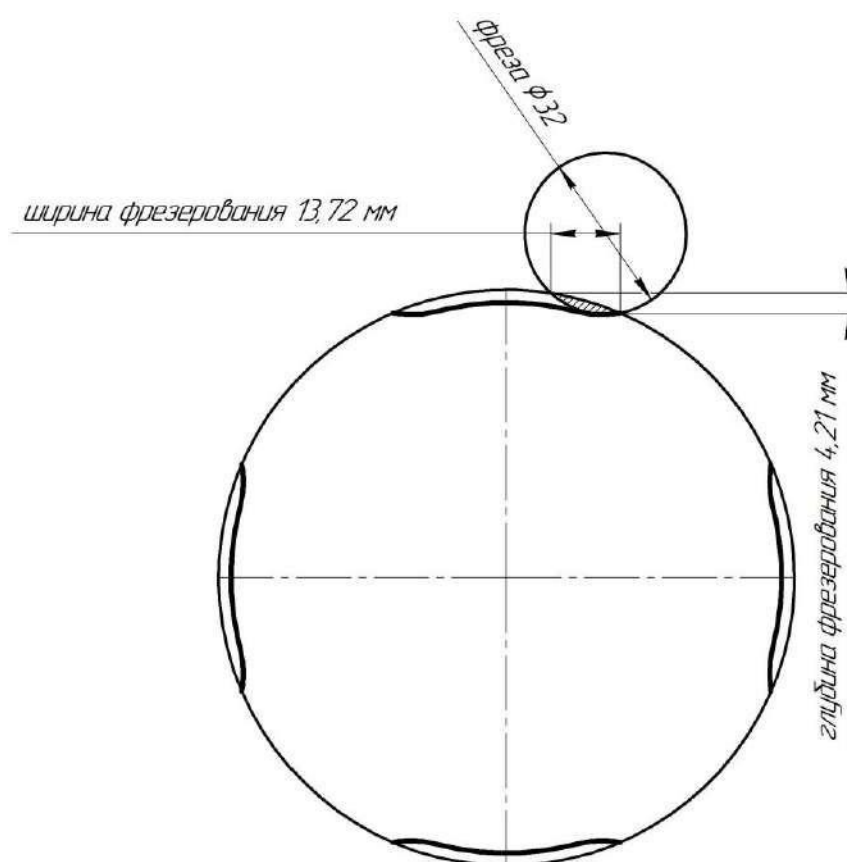


Рисунок 2.3 - Параметры фрезерования фасонной поверхности

После врезания на всю глубину обрабатываемого профиля для обработки цилиндрического участка поверхности применяли построчное перемещение фрезы с режимом резания: $V = 282,6$ м/мин, $n = 3000$ мин⁻¹, $S_{\text{мин}} = 3000$ мм/мин, $t = 2,5$ мм, $B = 0,4$ мм [21].

2.1.3 Программа фрезерования на станке с ЧПУ

Программное обеспечение использовалось для создания 3D-модели детали, выбора соответствующей стратегии обработки, определения скорости резания, продвижения на вставку и ширины фрезерования в соответствии с рекомендациями производителя инструмента [31].

Управляющая программы для обработки втулки на фрезерном станке с ЧПУ была написана с помощью современной САМ системы, использовали MasterCAM 2019 (П.1.3.5).

Когда все настройки были завершены, система САМ сгенерировала G-код для инструмента NC, картина перемещения инструмента относительно втулки показана на рис. 2.4 и 2.5.

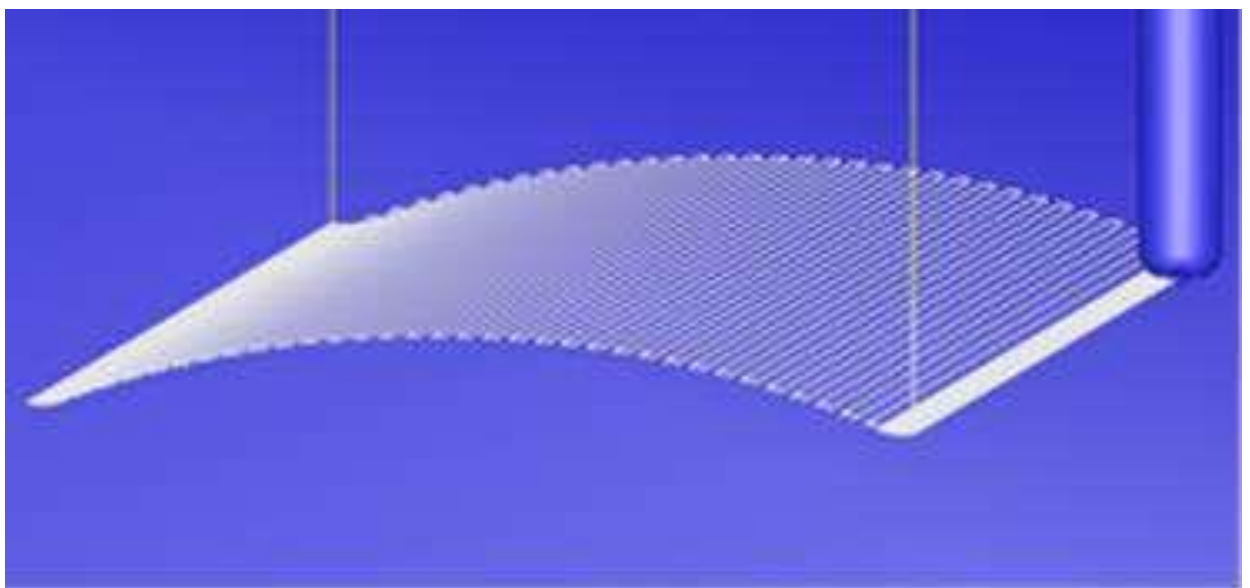


Рисунок 2.4 – Картина построчного перемещения фрезы

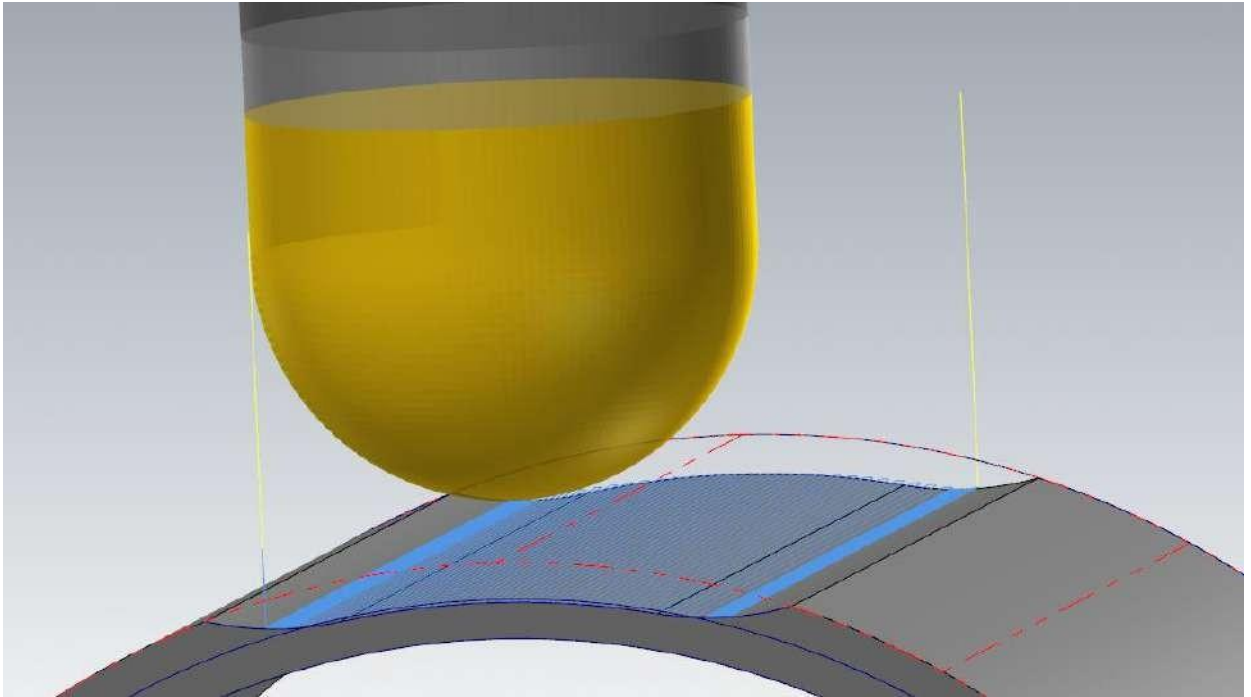


Рисунок 2.5 – Траектория движения инструмента

2.2 Сила резания при фрезеровании сферической фрезой

В известных классических [16,17,18, 39] и современных пособиях по расчету режимов резания [31,57,106] при фрезеровании сферической фрезой даются эмпирические зависимости по определению окружной (главной) составляющей силы резания. Прочие составляющие даются в процентах от главной.

В работе [74] показано, что при обработке тонкостенной втулки сферической двузубой фрезой с подачей на зуб 0,5 мм, подачей на ход 0,4 мм и частоте вращения 3000 мин^{-1} частота собственных колебаний втулки находится вне зоны автоколебаний [107].

2.2.1 Теоретические исследования

2.2.1.1 Осевая составляющая

Специфика резания сферической фрезой отличается наличием вблизи оси толщин срезаемых слоев материала заготовки и скорости резания,

стремящихся к нулю. Исследованию подобной специфики посвящены работы [74, 98].

В работе [100]: «была разработана аналитическая модель для прогнозирования значений минимальной толщины стружки, которые имеют решающее значение для разработки модели процессов, планирование и оптимизация процессов. Модель учитывает влияние термического разупрочнения и деформационного упрочнения на минимальную толщину стружки. Учтено влияние скорости резания и радиуса кромки инструмента на минимальную толщину стружки. Модель была экспериментально подтверждена для стали 1040 и А16082-Т6 в диапазоне скоростей резания и радиусов режущей кромки инструмента».

На рис. 2.6 представлена картина резания сферической фрезой и схема расчета параметров срезаемого слоя возникающих при резании сил, где:

- точка O – центр фрезы текущего реза,
- точка O_1 – предыдущего,
- R – радиус инструмента,
- t – глубина резания,
- s_z – подача на зуб,

$a(\varphi)$ - толщина срезаемого слоя, зависящая от угла положения режущей кромки в криволинейном треугольнике ABP (рис. 2.6).

Предложенная схема расчета с учетом переменной толщины срезаемого слоя, показанной на рисунке 2.6, позволяет рассчитать величину осевой силы резания как интеграл по углу φ от точки P до B :

$$P_{oc} = \int_{\varphi_0}^{\varphi_B} C_{pN} \cdot a(\varphi)^{0,75} \cdot \frac{\varphi}{R \cos d} \varphi, \quad (2.1)$$

где φ - угол между точкой пересечения контура режущей кромки сферической фрезы с её осью и рассматриваемой точкой режущей кромки.

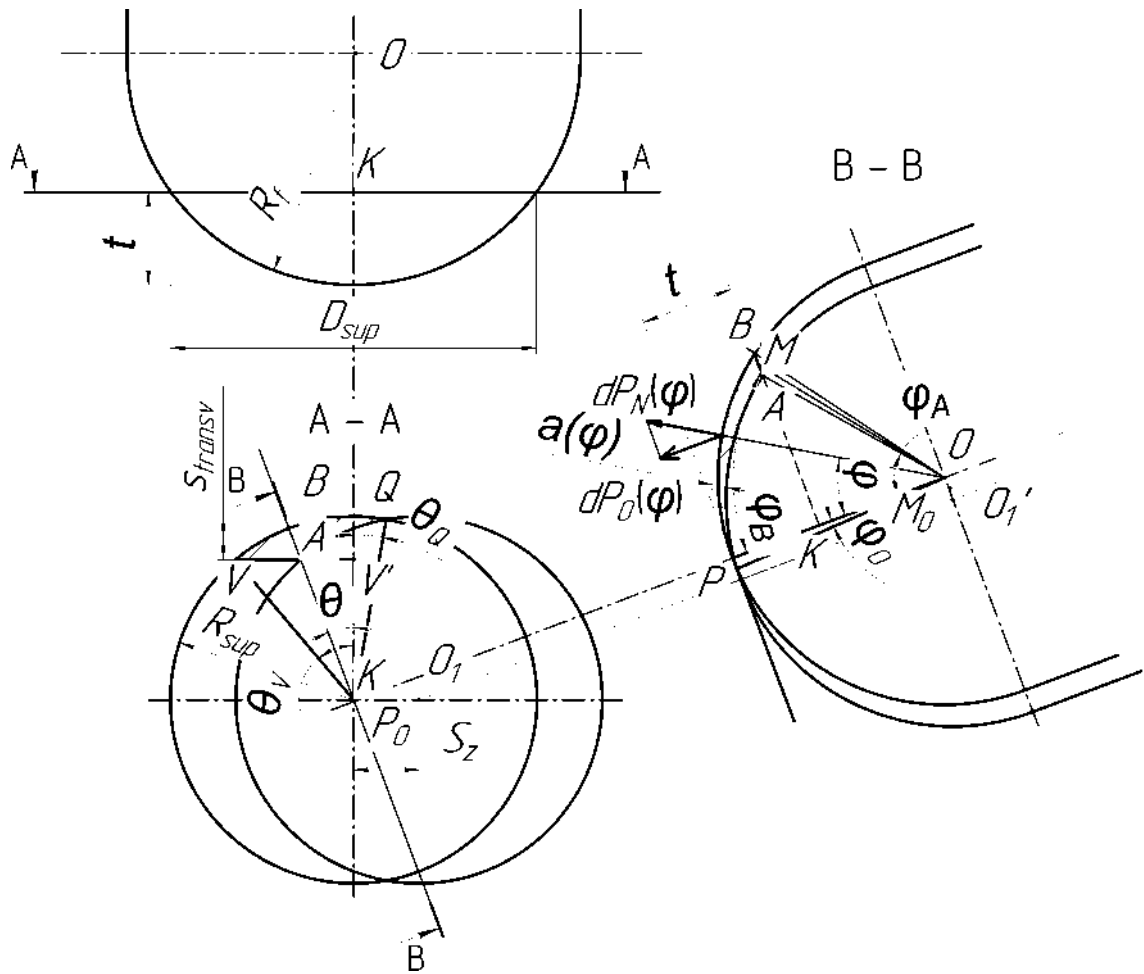


Рисунок 2.6 - Схема расчета параметров срезаемого слоя

Величина $a(\varphi)$ на участке от точки P до A может быть рассчитана по следующей упрощенной зависимости:

$$a(\varphi) = s_z \cdot \sin \varphi. \quad (2.2)$$

На участке от точки A до точки B

$$a(\varphi) = R - OM,$$

где M – произвольная точка на отрезке AB .

Из прямоугольного $\triangle OKM$ имеем $OM = \frac{OK}{\cos \varphi}$, $OK = R - t$, в результате на

отрезке AB

$$a(\varphi) = R - \frac{R - t}{\cos \varphi}. \quad (2.3)$$

Тогда формула (2.1) с учетом зависимостей (2.2) и (2.3) примет вид

$$P_{oc} = \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} C_{pN} \cdot \left(s_z \cdot \sin\varphi \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_0} C_{pN} \cdot \left(R - \frac{R-t}{\cos\varphi} \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos\varphi \cdot d\varphi. \quad (2.4)$$

Для применения на практике зависимости (2.4) необходимо получить формулы расчетов углов φ_0 для точки P , φ_A для точки A и φ_B для точки B . Так как проекция точки P на ось Ox расположена посередине между O и O_1 , то угол φ_0 будет зависеть от радиуса и величины s_z , из $\triangle OM_0P$ получаем

$$\sin\varphi_0 = \frac{PM_0}{OP} = \frac{s_z/2}{R},$$

или

$$\varphi_0 = \arcsin \frac{s_z}{2 \cdot R}. \quad (2.5)$$

Из $\triangle BKO$ ($BO=R$):

$$\cos(\varphi_B) = \frac{OK}{OB} = \frac{R-t}{R},$$

или

$$\varphi_B = \arccos \frac{R-t}{R}. \quad (2.6)$$

Из $\triangle AKO$:

$$\operatorname{tg}(\varphi_A) = \frac{AK}{OK} = \frac{BK - AB}{OK} = \frac{BO \cdot \sin(\varphi_B) - OO_1}{R-t} = \frac{\sqrt{2Rt - t^2} - s_z}{R-t},$$

или

$$\varphi_A = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{2Rt - t^2} - s_z}{R-t}. \quad (2.7)$$

Расчет по формуле (2.4) с учетом (2.5) – (2.7) можно выполнить в любом прикладном пакете, в работе использовался математический пакет Mathcad (таблица 2.1). Рассчитывалась осевая составляющая силы резания без учета постоянной C_{pN} , т.е. значение интеграла у:

$$y = \left[\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} \left(s_z \cdot \sin \varphi \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi d\varphi \right] \quad (2.8)$$

Таблица 2.1 - Вычисление составляющей осевой силы резания без учета постоянной C_{pN} .

Исходные данные для расчета в Mathcad		
$t := 2.5$	$R := 16$	$sz := \sqrt{0.5^2 + 0.4^2}$
Расчет в Mathcad		
$f0 := \arccos \left[\sqrt{1 - \left(\frac{sz}{2 \cdot R} \right)^2} \right]$		$f0 = 0.02$
$fb := \arccos \left[\frac{ (R-t) }{\left[\left(\frac{R}{2 \cdot R} \cdot t - t^2 - sz \right) \right]} \right]$		$fb = 0.567$
$fa := \operatorname{atan} \left[\frac{\sqrt{\quad}}{R-t} \right]$		$fa = 0.532$
$y0 := \int_0^{fa} (sz \cdot \sin(f))^{3/4} \cdot R \cdot \cos(f) df + \int_0^{f0} (sz \cdot \sin(f))^{3/4} \cdot R \cdot \cos(f) df$		
$y1 := \int_{fa}^{fb} \cos(f) \cdot R \cdot \left[R - \frac{(R-t)}{\cos(f)} \right]^{3/4} df$		
$y := y0 + y1$		$y = 2.123$

Для совмещения условных обозначений с символами Mathcad в последнем использованы обозначения: $y \rightarrow y$; $\varphi \rightarrow f$; $s_z \rightarrow sz$.

Тогда, после определения y , осевая составляющая силы резания может быть определена по зависимости

$$P_{oc} = yC_{pN} \cdot \quad (2.9)$$

В зоне $\varphi > 0,1$, где $a \gg 0$ справедливо известное соотношение $P_N = (0,4 \div 0,6)P_z$. Неизвестно, каково, может быть, значение C_{pN} при малых углах контакта $-0,1 > \varphi > 0,1$, так как здесь толщина срезаемого слоя стремится к нулю: $a \rightarrow 0$.

2.2.1.2 Радиальная составляющая

Предложенная на рис. 2.6 схема расчета позволяет рассчитать величину радиальной силы резания как интеграл по углу φ от точки P до B :

$$P_r = \int_{\varphi_0}^{\varphi_B} \left(C_{pN} \cdot a(\varphi)^{0,75} \cdot R \cdot \sin \varphi \right) d\varphi. \quad (2.10)$$

Величина $a(\varphi)$ на участке от точки P до A может быть рассчитана по следующей упрощенной зависимости:

$$a(\varphi) = s_z \cdot \sin \varphi. \quad (2.11)$$

Тогда формула (2.6) для осевой составляющей с учетом зависимостей (2.6) и (2.10, 2.11) придет для радиальной к виду

$$P_r = \int_{\varphi_0}^{\varphi_A} \left(C_{pN} \cdot (s_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \cdot R \cdot \sin \varphi \right) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(C_{pN} \cdot \left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \cdot R \cdot \sin \varphi \right) d\varphi. \quad (2.12)$$

Расчет по формуле (2.12) можно выполнить в любом прикладном пакете, в работе использовался математический пакет Mathcad (таблица 2.2). Рассчитывать радиальную составляющую силы резания без учета постоянной C_{pN} , т.е. значение интеграла x :

$$x = \left(\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} \left((s_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi \right) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \cdot R \cdot \cos \varphi \right) d\varphi \right) \quad (2.13).$$

Таблица 2.2 - Вычисление радиальной составляющей силы резания без учета постоянной C_{pN} .

$x0 := \int_0^{fa} (s_z \cdot \sin(f))^{0,75} \cdot R \cdot \sin(f) df + \int_0^{f0} (s_z \cdot \sin(f))^{0,75} \cdot R \cdot \sin(f) df$	
$x1 := \int_{fa}^{fb} \sin(f) \cdot R \cdot \left[R - \frac{(R-t)}{\cos(f)} \right]^{0,75} df$	
$x := x0 + x1$	$x = 0.773$

2.2.1.3 Окружная (главная) составляющая

Окружная (главная) составляющая на рис. 2.6 расположена перпендикулярно сечению $B-B$ и может быть вычислена по формуле

$$P_{\tan} = C_p R \int_{\varphi_0}^{\varphi_B} \left((s_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \cdot R \right) d\varphi = C_p R \int_{\varphi_0}^{\varphi_B} a(\varphi)^{0,75} d\varphi.$$

или

$$P_{\tan} = C_p R \left(\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} \left((s_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \right) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \right) d\varphi \right) \quad (2.14)$$

Рассчитывать окружную составляющую силы резания без учета постоянной C_p , т.е. значение интеграла y :

$$y = R \left(\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} \left((s_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \right) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \right) d\varphi \right) \quad (2.15)$$

также можно с использованием математического пакета Mathcad (табл. 2.3)

Таблица 2.3 - Вычисление окружной составляющей осевой силы резания без учета постоянной C_p .

$z0 := \int_0^{fa} (sz \cdot \sin(f))^{0,75} \cdot R \, df + \int_0^{fb} (sz \cdot \sin(f))^{0,75} \cdot R \, df$	
$z1 := \int_{fa}^{fb} R \cdot \left[R - \frac{(R-t)}{\cos(f)} \right]^{0,75} df$	
$z := z0 + z1$	$z = 2.281$

2.2.1.4 Момент резания

Для определения момента резания сферической фрезой нужно в каждой точке режущей кромки умножить значение мгновенной окружной силы на произведение радиуса режущей кромки на синус угла φ , а затем проинтегрировать получившуюся функцию от φ_0 до φ_B :

$$M = C_p R^2 \left[\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} \left((s_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \right) \sin \varphi \cdot d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \sin \varphi \right) d\varphi \right]. \quad (2.16)$$

Вспомогательная функция для определения момента резания без учета свойств обрабатываемого материала (постоянной C_p) выглядит так:

$$y = R^2 \left[\int_{\varphi_0}^{\varphi_A} \left((s_z \cdot \sin \varphi)^{0,75} \sin \varphi \right) d\varphi + \int_{\varphi_A}^{\varphi_B} \left(\left(R - \frac{R-t}{\cos \varphi} \right)^{0,75} \sin \varphi \right) d\varphi \right]. \quad (2.17)$$

$mr := R \cdot x$ $mr = 12.369$

Рис. 2.7 Вычисление момента силы резания без учета постоянной C_p в системе MathCad

2.2.2 Экспериментальные исследования

Для определения этого соотношения проанализируем результаты работы [84], в которой был поставлен специальный эксперимент (рис. 2.8).

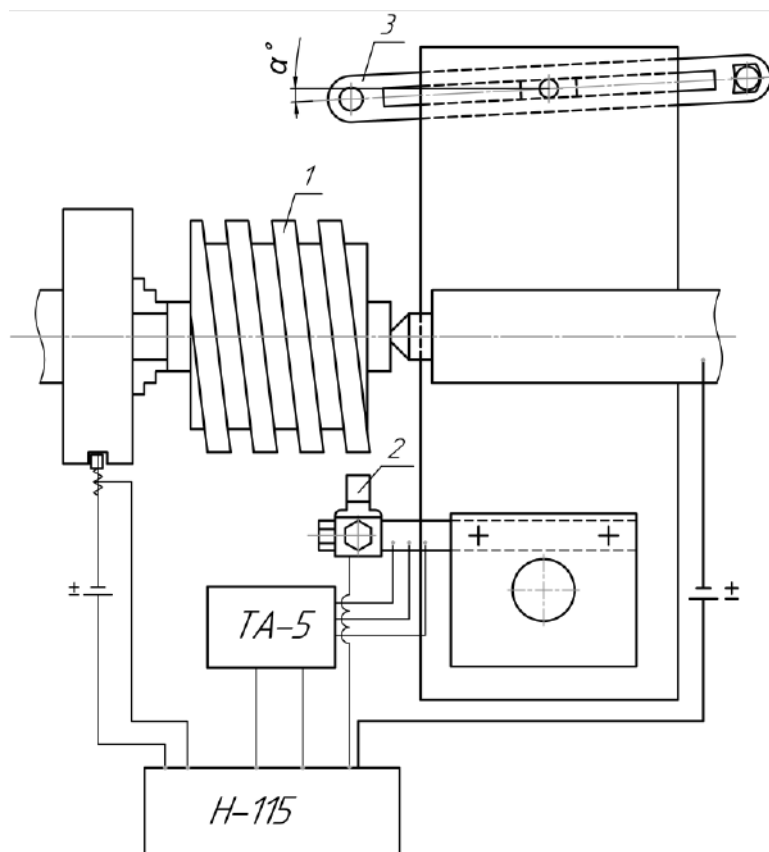


Рисунок 2.8 - Схема установки для экспериментального определения минимальной удельной нормальной силы резания: 1 — Заготовка; 2 — тензометрическая державка; 3 — копирная линейка

Деталь 1 с предварительно нарезанной прямоугольной резьбой с шагом 10 мм закреплялась с помощью цанговой оправки в трехкулачковом патроне станка «TOS» SV18R (Чехословакия) и поджималась центром. Резец устанавливался в специальной тензометрической державке 2. Для выборки люфтов и создания натяга в технологической системе суппорт и шпиндель станка оттягивались с помощью грузов. Лезвие резца перекрывало вершину выступа прямоугольной резьбы. Для обеспечения строгой параллельности лезвия резца вершине выступа резьбы производился зачистной проход.

Во время рабочего прохода с поперечной подачей $S_p = 0,087$ мм/об тангенциальная P_z и радиальная P_y фиксировали составляющие силы резания с помощью шлейфового осциллографа Н115. На пленке также отмечался момент касания резца с деталью и число оборотов детали. Совокупность упомянутых приемов позволила довольно точно фиксировать момент врезания лезвия резца в деталь.

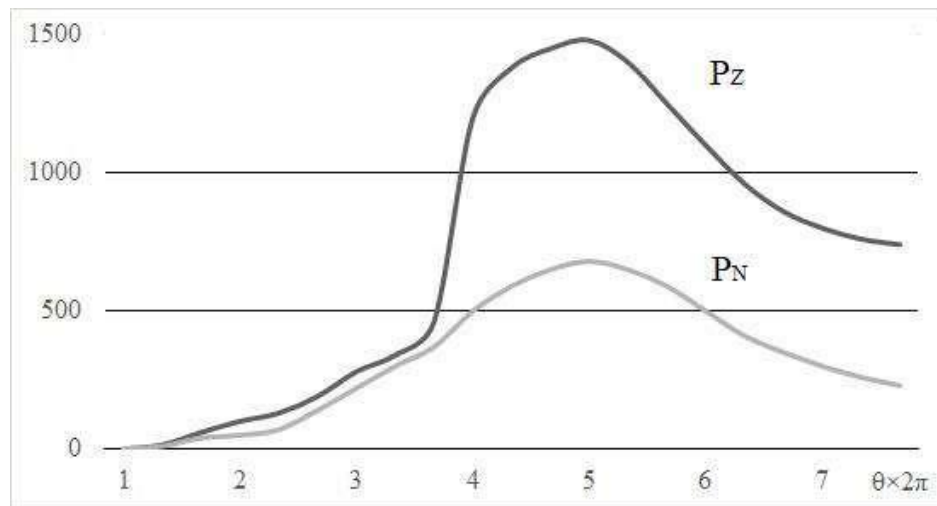


Рисунок 2.9- Экспериментальные зависимости главной P_z и нормальной P_N составляющих сил резания, Θ — угол поворота заготовки, отсчитанный с момента касания с инструментом

С момента касания резца с деталью (рис. 2.9) обе составляющие силы резания возрастают монотонно до момента начала резания. Момент врезания четко совпадает с резким возрастанием (в 2,5 раза) на осциллограммах главной составляющей силы резания P_z . В это же время радиальная (нормальная) составляющая силы резания P_y продолжала монотонно возрастать [66].

Во время эксперимента твердосплавными резцами из сплава Т15К6 с радиусом скругления режущей кромки $\rho_1 = 0,006$ мм обрабатывали заготовку из стали 40Х, закаленной до твердости 37...40 НРС, на скорости резания $v = 0,5$ м/с.

Из анализа графиков на рис. 2.9, следует вывод о том, что в зоне стабильного резания ($8\pi > \Theta > 10\pi$), радиальная (нормальная) составляющая силы резания C_{pN} , будет составлять

$$C_{pN} = (500/1200) C_{pz} = 0,4 C_{pz}. \quad (2.18)$$

На участке ($7\pi > \Theta > 8\pi$) главная составляющая силы резания P_z стремительно возрастает, вследствие начала процесса формирования и отделения стружки от основного материала заготовки, но при этом сила P_N сохраняет монотонный характер увеличения. Это дает право заявить, что при малых углах поворота шпинделя ($2\pi > \Theta > 7\pi$), соответствующим увеличению толщины срезаемого слоя a от 0 до a_{\min} , при котором начинается процесс резания, соотношение $C_{pN} = 0,4 C_{pz}$ таб сохраняет силу, но только не к моментальному соотношению, а к табличному значению. Это важно, поскольку срезания стружки еще нет, а нормальная сила, вдавливающая режущий клин в заготовке – есть.

Установлено, что при увеличении толщины срезаемого слоя обе составляющие силы резания возрастают монотонно до момента начала резания, но затем главная резко возрастает, а нормальная – монотонно, без скачков.

Показано, что для сферической фрезы методика определения осевой силы резания отличается от других инструментов.

Учитывая, что в эксперименте производилось точение с малыми скоростями резания, следует принять по аналогии с классическими работами [18, 122]:

$$C_{pN} = 0,5 C_{pz}. \quad (2.19)$$

На конкретном примере показаны результаты применения разработанной методики численного определения осевой силы и других силовых параметров для сферической фрезы (табл. 2.4, 2.5).

Таблица 2.4 – Силовые параметры фрезерования сферическими фрезами обрабатываемых материалов

Материал заготовки	P_{oc} ($y=2.123$), Н	P_r ($x=0.773$), Н	P_z ($z=2.281$), Н	M ($mr=12.369$), Н·мм
Сталь 45	106,15	38,65	230,4 Н	1249,269
Сталь 30	93,41	34,02	202,75	1111,938
Сталь 40Х	122,07	44,44	264,96	14366,935
Сплав В95	74,305	27,06	159,67	874,488

Таблица 2.5 – Физические свойства обрабатываемых материалов

Материал заготовки	Твердость, МПа	Прочность, σ_b , МПа	K_{mr}	C_p	C_{pN}
Сталь 45	207	750	1	101	50
Сталь 30	156	490	$\left(\frac{490}{750}\right)^{0,3} = 0,88$	89	44
Сталь 40Х	370	1200	$\left(\frac{1200}{750}\right)^{0,3} = 1,15$	116	58
Сплав В95	217	500	0,7	90	45

Для сплава В95 принят $K_{mr} = 0,7$, как произведение понижающего коэффициента для алюминиевых сплавов при фрезеровании (0,25) [38] и повышающего коэффициента (2,75) для высокопрочных алюминиевых сплавов с МПа>350 [30]. – Оттуда же $K_{mr} = \left(\frac{\sigma_b}{750}\right)^{0,3}$.

Выводы к главе 2

1. Обзор литературы показал отсутствие зависимости для определения наибольшего значения осевой (для сферической фрезы) силы резания нет.
2. Процесс резания сферической фрезой отличается наличием вблизи оси толщин срезаемых слоев материала заготовки и скорости резания, стремящихся к нулю, для которых нет доказанных зависимостей силы резания от геометрических параметров срезаемого слоя.

3. Экспериментально установлено, что при увеличении толщины срезаемого слоя главная и нормальная составляющие силы резания возрастают монотонно до момента начала резания, но затем главная резко возрастает, а нормальная – монотонно, без скачков.

4. Экспериментально установлено, что увеличение толщины срезаемого слоя от 0 до величины, при которой начинается процесс резания, соотношение нормальной к главной составляющей силы резания остается постоянным, но только не к моментальному соотношению, а к табличному значению. Это важно, поскольку резания стружки еще нет, а нормальная сила, вдавливающая режущий клин во втулку – есть.

5. Созданная картина резания сферической фрезой и схема расчета параметров срезаемого слоя возникающих при резании сил позволяет рассчитать величину осевой силы резания как определенный интеграл по углу между точкой пересечения контура режущей кромки сферической фрезы с её осью и точкой режущей кромки на её пересечении с обрабатываемой поверхностью.

6. Использование математического пакета Mathcad для решения определенного интеграла позволяет существенно сократить время вычисления составляющих силы резания и крутящего момента, возникающего под их действием.

3 ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ СХЕМЫ ОПРАВКИ С ПОВЫШЕННОЙ ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬЮ

3.1 Способы повышения виброустойчивости и конструкции оправок для базирования тонкостенных втулок

3.1.1 Обзор известных решений

При обработке резанием тонкостенных втулок снижается жесткость технологической системы и устойчивость к возникновению вибраций [48, 102]. Самым слабым звеном в технологической системе обычно является тонкостенная заготовка и для повышения жесткости технологической системы применяют специальные приспособления, в которых предусматривают дополнительный поджим тонкой стенки обрабатываемой заготовки [6, 7, 8, 111].

При фрезеровании тонкостенных заготовок дополнительным возмущающим фактором является периодическое изменение силы резания по величине и направлению [26]. Причем обработка заготовки, уже имеющей следы на поверхности резания, вызывает регенеративный эффект, приводящий к увеличению колебаний. В машиностроении известны способы и устройства, повышающие жесткость и виброустойчивость тонкостенных втулок при обработке резанием [6, 7, 8, 12, 22, 80, 111].

Например, внутрь тонкостенной заготовки заливают жидкость с последующим её отверждением путем охлаждения или кристаллизации. Для устранения схватывания заполнителя с материалом заготовки её внутреннюю поверхность обмазывают веществом, которое не смачивается вводимой жидкостью [7].

Недостатком известного способа является применение жидкостей, которые необходимо охлаждать до полного затвердевания, что влечет за собой увеличение времени на подготовку заготовки к операции.

Для закрепления тонкостенных заготовок при снижении их деформирования применяют способ воздействия на локальный участок внутренней поверхности заготовки радиально направленных сил [12].

Отрицательным свойством этого способа является низкая точность обработки из-за того, что локальное закрепление заготовки способствует возникновению вибраций на незакрепленных участках заготовки. Также необходимо задавать базовый участок поверхности из условия обеспечения соосности обрабатываемой и базовой поверхностей. Это влечет за собой увеличение времени на подготовку заготовки к операции.

Например, используется оправка (рис. 3.1), в которой на центральном стержне расположены несколько разжимных элементов со скошенными поверхностями [6].

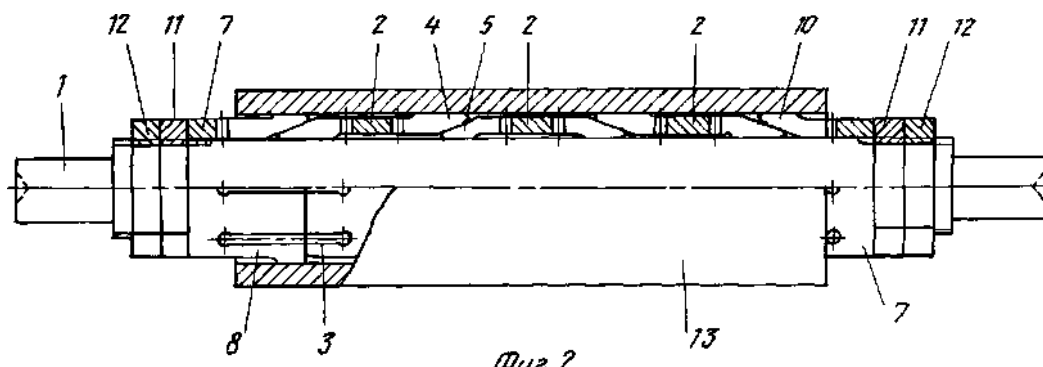


Рисунок 3.1 - Цанговая оправка [5]

Скошенные элементы создают местный контакт с ограниченным участком внутренней поверхностью обрабатываемой заготовки, а это вызывает непостоянные местные упругие деформации стенок заготовки и, соответственно, к погрешностям геометрической формы обработанной детали.

Для частичной компенсации указанных погрешностей разработана конструкция оправки (рис. 3.2), в которой в дополнение к расположенным на центральном стержне нескольким разжимным элементам со скошенными поверхностями установлены несколько распорных втулок для

распределения зажимных сил по всей длине зажимаемой заготовки [8].

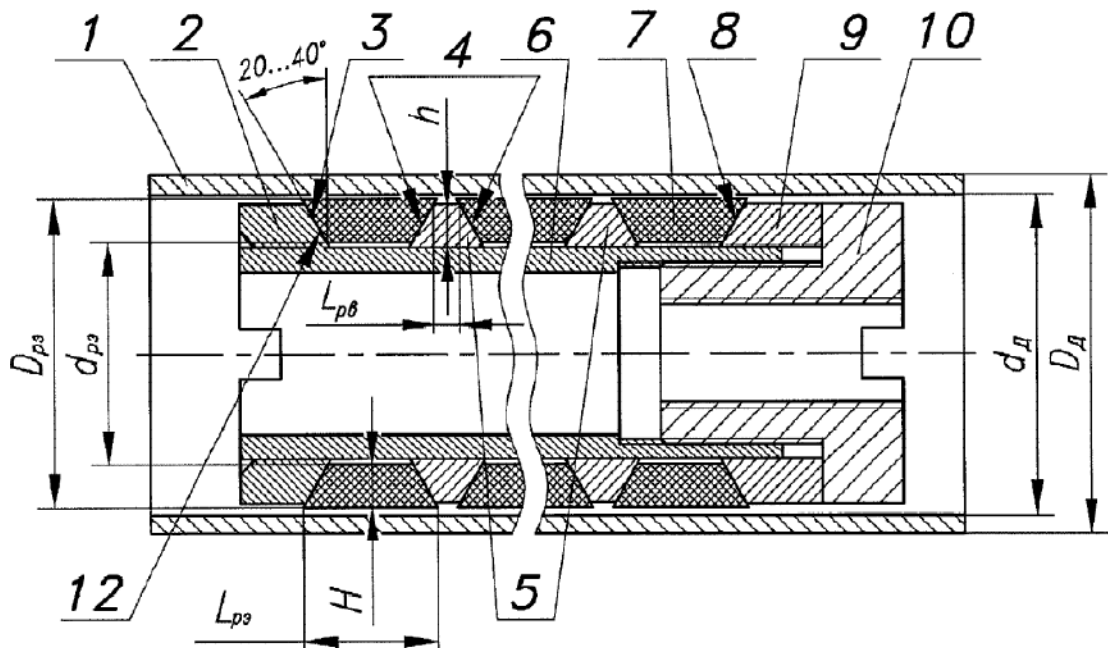


Рисунок 3.2 - Оправка с распорными втулками [8]

Недостаточная точность при обработке на описанной оправке является следствием того, что заготовка поджата только в средней части, поэтому при обработке крайних, неподкрепленных, участков тонкостенной заготовки

Известные конструкции специальных приспособлений, в которых предусматривают дополнительный поджим тонкой стенки обрабатываемой заготовки [6, 7, 8, 111] не дают должного эффекта для фрезерования втулки, показанной на рис. 1.1, так необходимо точно центрировать втулку по краям внутренней цилиндрической поверхности базового отверстия и одновременно поджимать изнутри тонкую стенку втулки.

Наиболее подходящей для фрезерования тонкостенных втулок можно считать конструкцию оправки, предложенную сотрудниками Ижевского механического института Александровым А.А., Федоровым Б.В. и Ельцовым Ю.А. [11] (рис. 3.3).

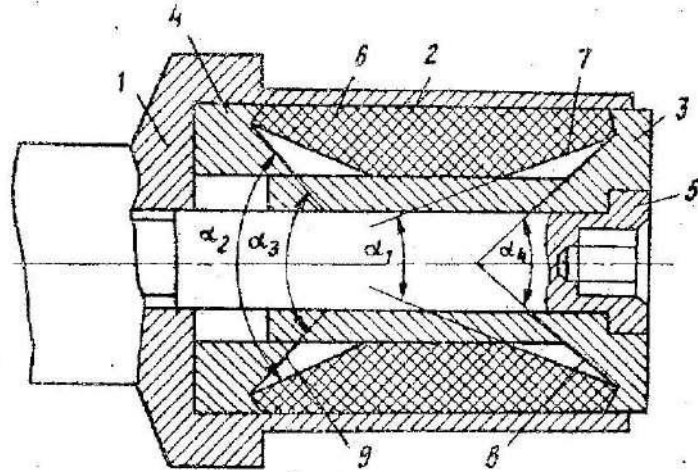


Рисунок 3.3 – Оправка с упругодеформируемым эластичным элементом для закрепления тонкостенных цилиндрических заготовок [11]: 1 – корпус, 2 - тонкостенная рабочая часть корпуса, 3и 4 – втулки, 5 – винт, 6 - упругодеформируемый эластичный элемент

Несмотря на рекламируемую высокую абразивную стойкость, после трех месяцев эксплуатации втулки потребовалась замена втулки.

Оригинальное решение представлено в китайском патенте CN201310080769.4A [10] (рис. 3.4).

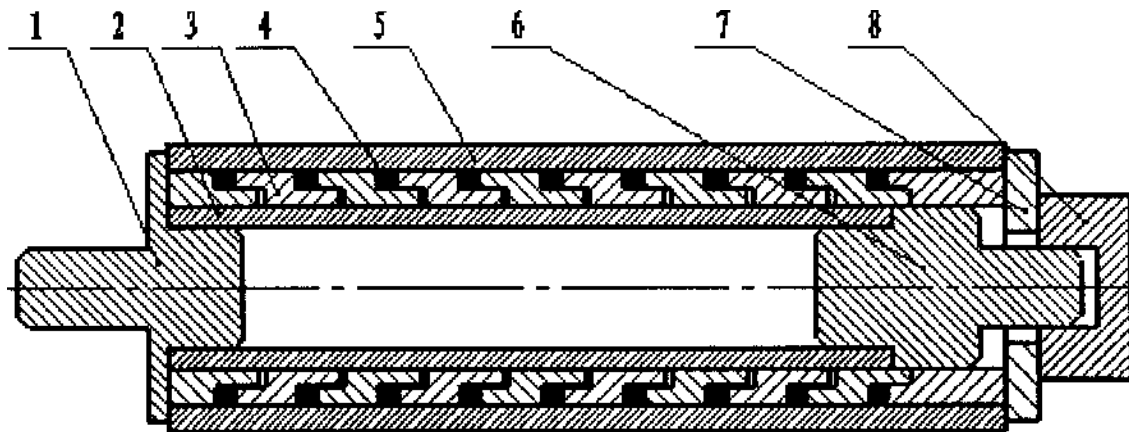


Рисунок 3.4 – Схема оправки с *O*-образными резиновыми уплотнительными кольцами: 1 - Левый позиционирующий шпindel, 2 - опорная трубка, 3 – поршневое кольцо, 4 - резиновые уплотнения, 5 –заготовка, 6 - правая базирующая оправка, 7 – шайба, 8 – зажим

Изобретение обеспечивает быстрый зажим для фрезерования заготовки типа тонкостенной трубы с использованием способа объединения стержневого вала, поршневого кольца и резинового уплотнительного кольца в форме *O* и направлено на решение проблемы, заключающейся в том, что тонкостенная алюминиевая труба, которая обычно используется для изготовления испарителя кондиционера, часто сильно деформируется во время фрезерования. Когда приспособление зажимает обработанную тонкостенную алюминиевую трубку, *O*-образное резиновое уплотнительное кольцо деформируется до определенной степени и плотно прижимается к внутренней стенке тонкостенной алюминиевой трубки, так что жесткость тонкостенной алюминиевой трубки повышается, улучшая способность сопротивляться деформации, а заготовка тонкостенного типа не подвергается вибрации и деформации при фрезеровании.

Поршень - 3 и резиновое уплотнительное кольцо - 4 поочередно установлены на опорной трубке - 2. При работе тонкостенная алюминиевая заготовка - 5 устанавливается на опорную трубку - 2, а левая установочная оправка - 1 вместе с тонкостенной алюминиевой заготовкой - 5 вставляется в установочное отверстие. Затем справа прикладывают нагрузку на прижимную шайбу - 7 от зажима - 8.

Шайба - 7 перемещается влево, толкая поршневое кольцо - 3, также, последовательно перемещаясь влево, поршень - 3 будет выдавливать резиновые уплотнительные кольца - 4. Последние, деформируясь, плотно прижимаются между наружной стенкой опорной трубы - 5 и внутренней стенкой заготовки - 2, увеличивая жесткость тонкостенной алюминиевой заготовки, улучшая способность противостоять деформациям и предотвращая вибрации тонкостенной заготовки и деформации.

3.1.2 Предлагаемая конструктивная схема оправки повышенной виброустойчивости

Теоретические исследования, проведенные отечественными и зарубежными исследователями и конструкторами [16, 56, 66, 67], позволили определить основные положения, которые были учтены при разработке конструкций оправки с повышенной виброустойчивостью [9].

Для повышения точности обработки тонкостенных втулок предлагается новый способ закрепления тонкостенных втулок. Закрепление осуществляют, формируя радиально направленные силы для последующей механической обработки, для чего втулку устанавливают на упругоэластичную вставку, расположенную на оправке с зажимными элементами, жестко базируют по технологическим базам, формируют изотропные радиально направленные силы, распирающие втулку изнутри осевым сжатием упругоэластичной вставки (рис. 3.5).

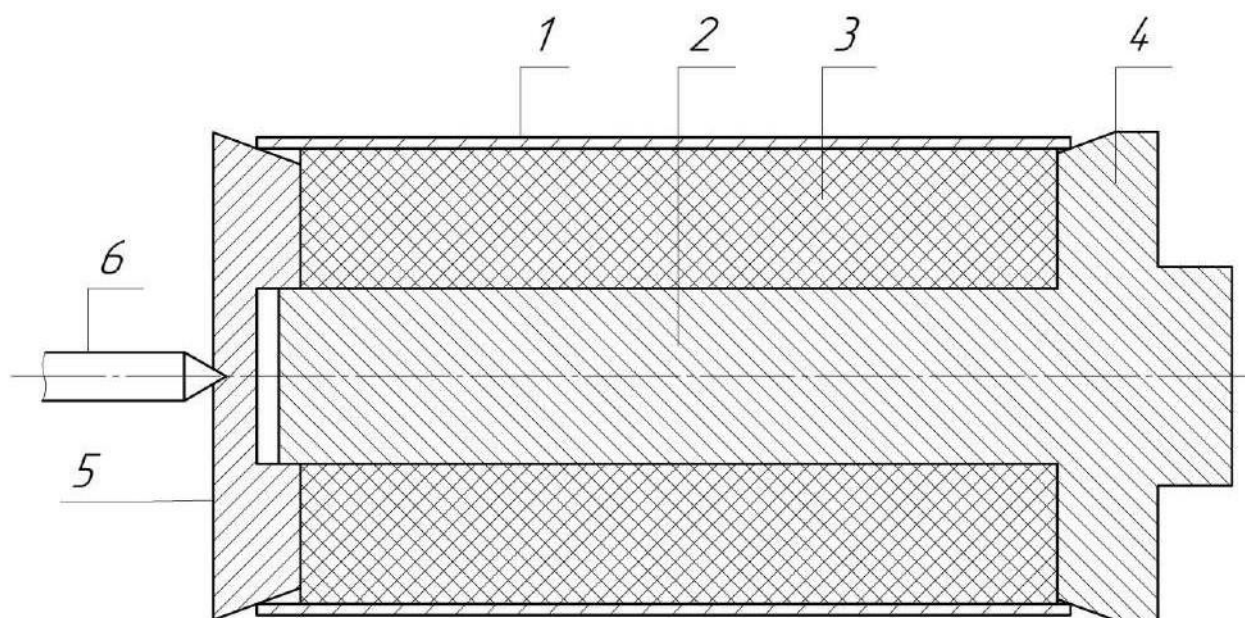


Рисунок 3.5 - Схема закрепления тонкостенной втулки: втулка – 1, оправка - 2, упругоэластичная вставка –3, задний срезанный центр - 4, передний срезанный центр - 5, задний центр - 6

Способ закрепления тонкостенных цилиндрических втулок осуществляется следующим образом. Тонкостенную цилиндрическую втулку 1 устанавливают на оправку 2, снабженную упругоэластичной вставкой 3. упругоэластичную вставку 3, выполненную из упругоэластичного материала, располагают между задним срезанным центром - 4 и передним срезанным центром - 5. Затем осевым сжатием упругоэластичной вставки, под действием заднего центра - 6, формируют изотропные радиально направленные силы, распирающие втулку изнутри и повышающие тем самым её виброустойчивость и жесткость.

Авторы, основываясь на предложенном способе, разработали оправку для закрепления маложестких цилиндрических втулок. Реализация предложенного способа достигается тем, что используется разработанная оправка, конструкция которой поясняется чертежом на рис. 3.6 [9].

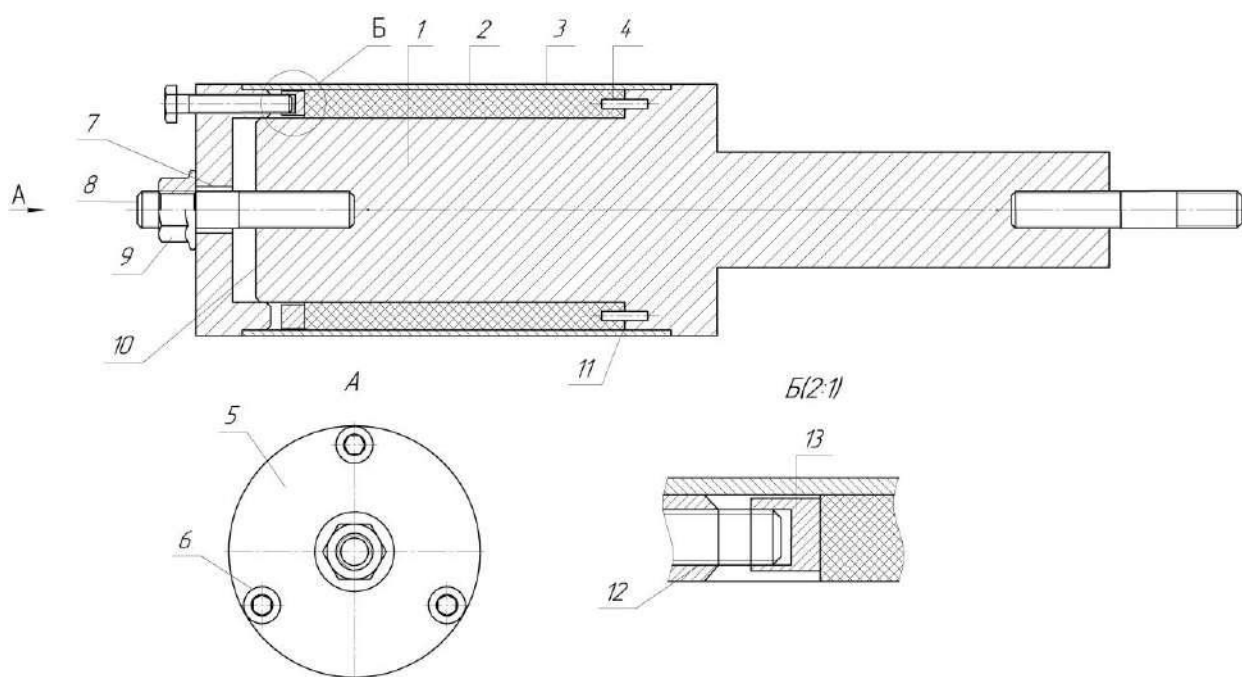


Рисунок 3.6 – Схема оправки по патенту [9]

На зажимной крышке 5 равномерно расположены резьбовые отверстия 12, в которые ввинчены зажимные винты 6. С помощью резьбового соединения крышка привинчивается через центральное отверстие 7

шпилькой 8 и гайкой 9 к переднему торцу 10 центрального стержня 1. Между упругоэластичной вставкой 2 и зажимной крышкой 5 расположена распорная шайба 13, имеющая пазы, размеры которых соответствуют угловым размерам резьбовых отверстий 12 на зажимной крышке 5 и ширину больше стержня винта 6. Упругоэластичная вставка 2 выполнена из упругого материала, а распорная шайба 13 из материала, обеспечивающая деформацию упругоэластичной вставки до равномерного контакта с внутренней поверхностью втулки 3.

Тонкостенную цилиндрическую втулку 3 устанавливают на центральный стержень 1, снабженный упругоэластичной вставкой 2. На передний торец центрального стержня 10 устанавливают зажимную крышку 5. При этом зажимная крышка 5 своими буртиками центрирует и направляет тонкостенную цилиндрическую втулку 3. Гайкой 9 и шпилькой 8 прижимают зажимную крышку 5 к переднему торцу 10 центрального стержня 1. Через зажимные винты 6 и через распорную шайбу 13 сжимают упругоэластичную вставку 2. При этом второй торец упругоэластичной вставки 2 прижат к кольцевой ступени 11 центрального стержня 1 и зафиксирован в осевом направлении аксиальными базирующими штифтами 4 через ответные отверстия на торце упругоэластичной вставки 2. Упругоэластичная вставка 2 выполнена из полиуретана твердостью 70 ед. по Шору, под сжатием будет создавать избыточное давление и расширение упругоэластичной вставки 2 до контакта с втулкой 3. При закреплении втулки 3 на станок для ее обработки, силу затяжки зажимных винтов 6 и гайки 9 необходимо контролировать при помощи динамометрического ключа, на котором предварительно выставлена необходимая нагрузка.

3.2. Аналитическое описание осевого сжатия эластичных колец

Для обеспечения правильного функционирования предложенной оправки (см. рис. 3.6) нужно знать характер поведения упругоэластичного

Если не учитывать трение на торцах упругоэластичной вставки, контактирующих со шлифованными стальными поверхностями приспособления, то упругоэластичную вставку 4 по закону Гука укорачивается на величину

$$\Delta l = l_1 - l_2 = l_1 \sigma / E, \quad (3.1)$$

где σ – напряжение сжатия упругоэластичной вставки, МПа,

E – модуль упругости материала упругоэластичной вставки, МПа.

С помощью коэффициента Пуассона находим связь относительного сжатия с относительным утолщением упругоэластичной вставки:

$$\delta_l = \frac{\Delta l}{l_1} = \frac{\sigma}{E} = \frac{\delta_d}{\mu} = \frac{\Delta d}{\mu \cdot d_1}, \quad (3.2)$$

откуда

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta d}{\mu \cdot d_1}, \quad (3.3)$$

или

$$\sigma = \frac{\Delta d E}{\mu \cdot d_1}, \quad (3.4)$$

где μ - коэффициент Пуассона, $\mu=0,5$,

$$\Delta d=0,1 \text{ мм},$$

$$E=15 \text{ МПа},$$

$$d_1=104 \text{ мм}.$$

Тогда расчетное давление для нашего случая определится как

$$\sigma=(0,1 \times 15)/(0,5 \times 104)=1,5/52=0,03 \text{ МПа}. \quad (3.5)$$

Соответственно сила, необходимая для выборки зазора:

$$F = \sigma S, \quad (3.6)$$

где S – площадь поперечного сечения упругоэластичной вставки:

$$S=\pi(D^2-d^2)/4=\pi(104^2-70^2)/4=\pi(10816-4900)/4=4646 \text{ мм}^2,$$

где D , d – наружный и внутренний диаметры упругоэластичной вставки.

Тогда минимальная сила, необходимая для выборки зазора $\Delta d=0.1$ мм составит:

$$F=0,03 \times 4646 = 139,38 \text{ Н.} \quad (3.7)$$

3.2.2 Теория В.Д. Продана

Известна теория Продана В.Д. [61, 62] для сжатия упругой прокладки между двумя фланцами при ее осевом нагружении.

Для свободного надевания обрабатываемой втулки на виброустойчивую оправку необходимо предусмотреть некоторый зазор Δd , который в начале сжатия упругоэластичной вставки должен быть полностью выбран.

Как показано Проданом В.Д. [61, 62]: «Внутренний диаметр прокладки при ее осевом нагружении остается практически неизменным, если нет ограничения ее радиальной деформации по внешнему контуру» (Рис. 3.8).

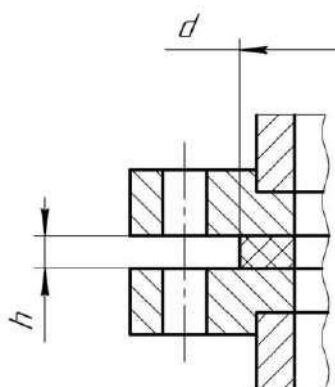


Рисунок 3.8 – Схема осевого нагружения эластичной прокладки по В.Д. Продану [61, 62]

Высота прокладки от осевой нагрузки определяют по зависимости [61, 62]

$$h = h_0 \left(1 - q_3 / E_{\text{compr}} \right), \quad (3.8)$$

где q_3 – удельная осевая нагрузка.

В результате осевой деформации диаметр прокладки увеличится на величину:

$$\Delta d = (\mu - f)d_0q_3 / E_{\text{compr}} \quad (3.9)$$

и станет равным:

$$d = d_0 \left[1 + (\mu - f)q_3 / E_{\text{compr}} \right], \quad (3.10)$$

где f – коэффициент трения материала прокладки и замыкающих ее поверхностей фланцев,

q_3 – удельная нагрузка на прокладку,

μ – коэффициент Пуассона,

$E_{\text{сж}}$ – модуль упругости на сжатие,

h – высота и d – диаметр прокладки.

Откуда можно вывести зависимость

$$q = \frac{\Delta d \cdot E_{\text{compr}}}{d_0(\mu - f)} \quad (3.11)$$

Подставляя известные данные, получаем $q=0,06$ МПа

Для нахождения Δd из формулы (3.11) выведем зависимость:

$$\Delta d = q_3 \frac{(\mu - f)d_0}{E_{\text{compr}}}, \quad (3.12)$$

подставляя в которую известные данные:

$$\mu=0,496, \quad f=0,965q^{-0,375}=0,965/0,03^{0,375}=0,965/0,268=0,259 \approx 0,26; \quad E_{\text{сж}}=15 \text{ МПа},$$

$d_0 = 104$ мм, причем q_3 равно ранее определенному напряжению во втулке

$\sigma=0,03$ МПа, получим величину приращения диаметра упругоэластичной вставки $\Delta d=0,03 \times (0,496-0,26) \times 104/15=0,049$ мм, что почти в 2 раза меньше, чем определенное с использованием зависимости (3.4).

3.2.3 Теория С.Н. Яковлева

Известна работа Яковлева С.Н. [71] для случая осевого сжатия цилиндрического образца при деформациях менее 25 % (Рис. 3.9).

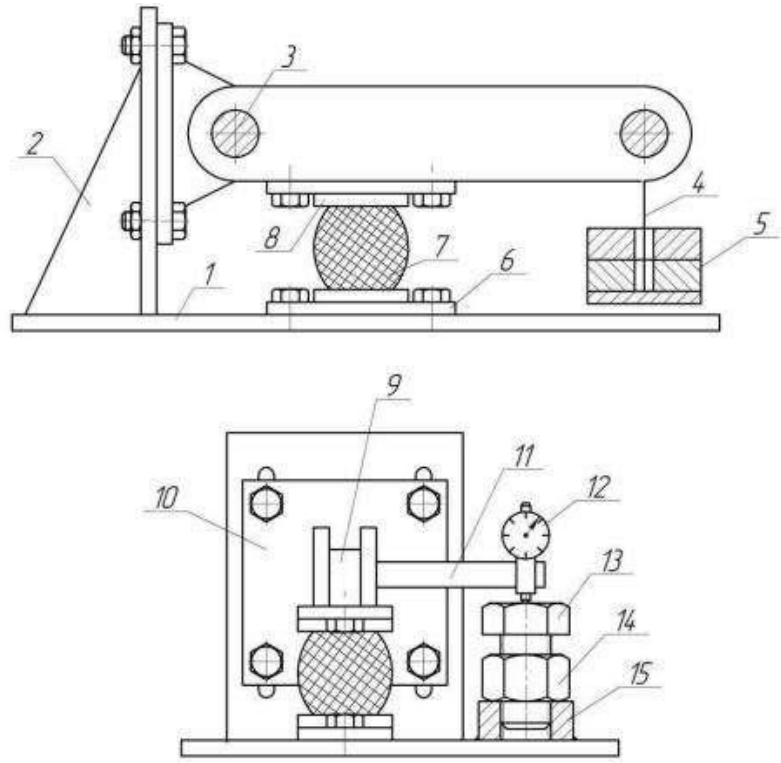


Рисунок 3.9 - Нагружающее устройство: 1 — основание; 2 — стойка; 3 — ось; 4 — подвес; 5 — груз; 6 — нижняя плита; 7 — образец; 8 — верхняя плита; 9 — рычаг; 10 — кронштейн; 11 — кронштейн индикатора; 12 — индикатор; 13 — винт; 14 — контргайка; 15 — бобышка

В данной работе [71] зависимость «напряжение — деформация» представлена в виде:

$$\delta = \frac{H\sigma}{\beta_1 E_{изд}} . \quad (3.13)$$

Модуль упругости $E_{изд}$ определяется по формуле:

$$E_{изд} = E_{сто} K_{тор} K_{фор} K_{деф}, \quad (3.14)$$

где $E_{сто}$ — начальный модуль упругости полиуретана при сжатии, МПа;

$K_{тор}$ — коэффициент, учитывающий трение на торцах изделия;

$$K_{тор Ra 1,25} = 1,05.$$

$K_{фор}$ — коэффициент формы,

$K_{деф}$ — коэффициент деформативности при сжатии.

Коэффициент деформативности определяется по формуле

$$K_{\text{деф}} = \left(1 + \frac{ShA^{1.17}}{1000}\right), \quad (3.15)$$

где ShA — твердость полиуретана по Шору.

Коэффициент формы определяется по формуле

$$K_{\text{фор}} = (0,8 + \Phi), \quad (3.16)$$

где Φ — фактор формы изделия, который равен:

$$\Phi = \frac{D-d}{4H}, \quad (3.17)$$

где D — внешний диаметр цилиндра, мм;

d — внутренний диаметр цилиндра, мм;

H — высота цилиндра, мм; $H=147$ мм.

Для нашего примера (см. п. 3.2.1) найдем фактор формы изделия:

$$\Phi = \frac{D-d}{4H} = \frac{104-70}{4 \times 147} = 0,06, \quad (3.18)$$

коэффициент деформативности:

$$K_{\text{деф}} = \left(1 + \frac{ShA^{1.17}}{1000}\right) = \left(1 + \frac{75^{1.17}}{1000}\right) = 1,16, \quad (3.19)$$

модуль упругости:

$$E_{\text{изд}} = 15 \times 1,05 \times 0,84 \times 1,16 = 15,35 \text{ МПа}, \quad (3.20)$$

коэффициент ужесточения при сжатии упругоэластичной вставки:

$$\beta_1 = 0,73 + 0,46 \times 0,48^2 = 0,73 + 0,46 \times 0,23 = 0,84, \quad (3.21)$$

площадь сечения упругоэластичной вставки:

$$S = \pi(D^2 - d^2)/4 = \pi(104^2 - 70^2)/4 = \pi(10816 - 4900)/4 = 4646 \text{ мм}^2. \quad (3.22)$$

Подставив эти данные в формулу (3.13), получим величину осадки образца при давлении $\sigma=0,03$ МПа

$$\delta = \frac{147 \times 0,03}{0,84 \times 15,35} = 0,34 \text{ мм}. \quad (3.23)$$

Линейную осадку δ должно компенсировать увеличение диаметра образца, однако, как видно из рис. 3.9, при сжатии образец меняет форму, поэтому с помощью коэффициента Пуассона нельзя достоверно определить увеличение диаметра образца.

Поскольку в нашем случае предполагается выбрать минимальный зазор между втулкой и упругоэластичной вставкой $\Delta d=0,1$ мм, будем полагать, что поперечная деформация связана с продольной зависимостью Пуассона

$$\delta = \frac{\Delta d \cdot H}{d \cdot 0,496} . \quad (3.24)$$

Тогда
$$\Delta d = d \cdot 0,496 \frac{\delta}{H} = 104 \times 0,496 \times 0,35 / 147 = 0,124 \text{ мм},$$
 то есть

больше, чем при определении по аналитической зависимости (3.4).

Для нахождения необходимого давления, оказываемого на упругоэластичную вставку, подставим в формулу (3.13) полученные значения и получим $\sigma=0,03$ МПа.

Совпадение результатов расчета по выведенной зависимости и по формуле Яковлева С.Н. объясняется одинаковой расчетной моделью. Наша зависимость выведена аналитически и более проста в применении.

Разница в результатах расчета по выведенной зависимости и по формуле Продана В.Д. объясняется тем, что в последней предполагается тонкая прокладка.

Поэтому для обоснования применения одной из методик потребуется экспериментальная проверка в реальных условиях

3.2.4 Проверка полученных аналитических данных

Для проверки полученных расчетов был поставлен эксперимент. (рис. 3.10). На зажимную крышку, было оказано давление 0,03 МПа при помощи груза массой 14 кг.



Рисунок 3.10 - Фотография проведения эксперимента

После установки груза, был измерен диаметр упругоэластичной вставки в шести местах с помощью микрометра по схеме, показанной на рисунке 3.11.

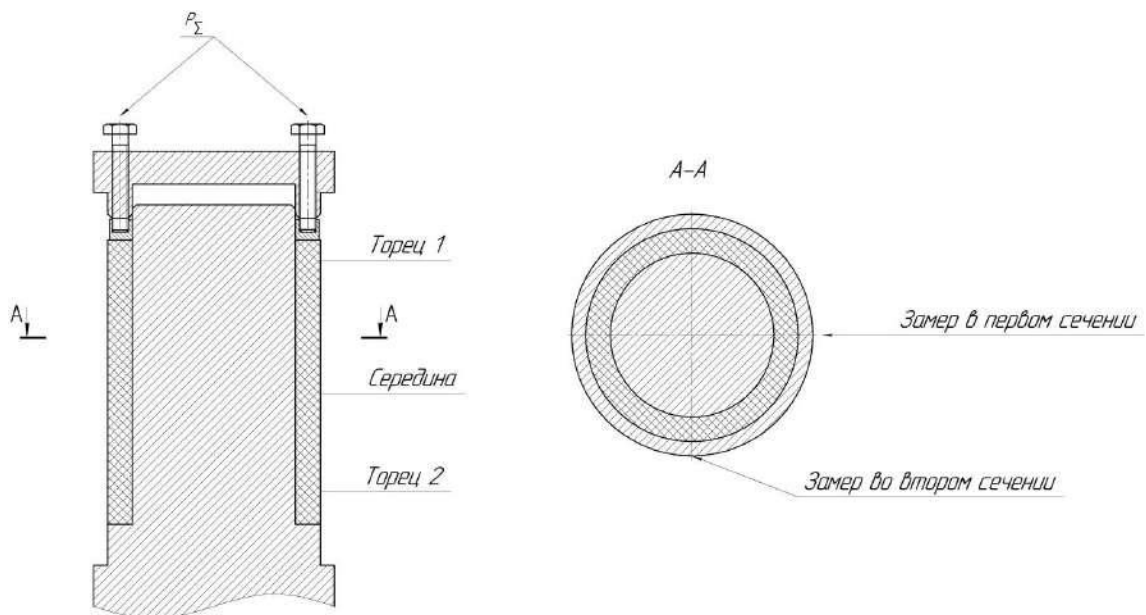


Рисунок 3.11 Схема замера диаметральных размеров упругоэластичной вставки

Результаты измерений заносились в таблицу 3.1

Таблица 3.1 - Результаты эксперимента

№ опыта	Замеры в первом сечении в мм			Замеры во втором сечении в мм		
	Торец 1	Середина	Торец 2	Торец 1	Середина	Торец 2
0	103,99	104	104	103,99	104	104
1	103,99	104,07	104	103,99	104,07	104

Из проведенного эксперимента можно сделать вывод, что при приложении нагрузки к упругоэластичной вставки произошло увеличение её диаметра в центральной части на 0,07 мм.

Данные, полученные в ходе аналитического описания в главе 3.2. были занесены в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Сводная таблица значений силы и давления

№ случая	Давление $p_{мин}$, МПа	Приращение диаметра, мм	Диаметр	Относительная погрешность расчета, %
1. Аналитическая зависимость	0,03	0,1	104,1 мм	42,85
2 Расчет по формуле В.Д. Продана	0,03	0,049	104,049	30,0
3 Расчет по формуле С.Н. Яковлева	0,03	0,1	104,1	42,85
4. Экспериментальное значение	0,03	0,07	104,07	0
5. По рекомендуемой формуле	0,03	0,07	104,07	0

Из сводной таблицы данных, полученных в ходе аналитических описаний, можно сделать вывод, что расчет по формуле Продана В.Д. дает ошибку 30 %, по нашей формуле и по формуле Яковлева С.Н. 42,85 % по сравнению с результатом с экспериментальных значений. Поскольку изначально в нашей формуле не учитывалось влияние трения по торцам нагружаемой втулки, то с учетом экспериментальных данных был введен поправочный коэффициент 0,7:

$$\sigma = 0,7 \frac{\Delta_d E}{\mu d_1} \quad (3.25)$$

Полученную формулу (3.25) рекомендуем для практического расчета необходимого напряжения сжатия полиуретановых втулок в зависимости от требуемого увеличения диаметра. Тогда для выборки диаметрального зазора $\Delta_d=0,1$ мм потребуется давление $p_{\text{мин}} = 0,043$ МПа, а для выборки зазора $\Delta_d=0,23$ мм потребуется давление $p_{\text{мин}} = 0,099$ МПа

3.2.5 Гипотеза о неравномерном распределении давления по длине оправки

Возникает вопрос: «Одинаково ли распределяется давления по длине оправки при достижении полного контакта упругоэластичной вставки с базируемой втулкой?».

Объяснение такому вопросу может служить следующая гипотеза (рис. 3.12). При нажатии центром на упругоэластичную вставку 4 силой P в первом кольце возникает давление

$$p_1 = P / S, \quad (3.26)$$

где $S = \pi(R^2 - r^2)$ - площадь поперечного сечения эластичного кольца.

Тогда при попытке виртуального перемещения первого кольца, сила его нажима на второе уменьшится на величину силы трения между первым кольцом и стальной втулкой

$$F_1 = f\pi R l_1 p_1, \quad (3.27)$$

где l_1 – длина кольца;

f – коэффициент трения;

R – радиус кольца;

p_1 – давление в первом кольце;

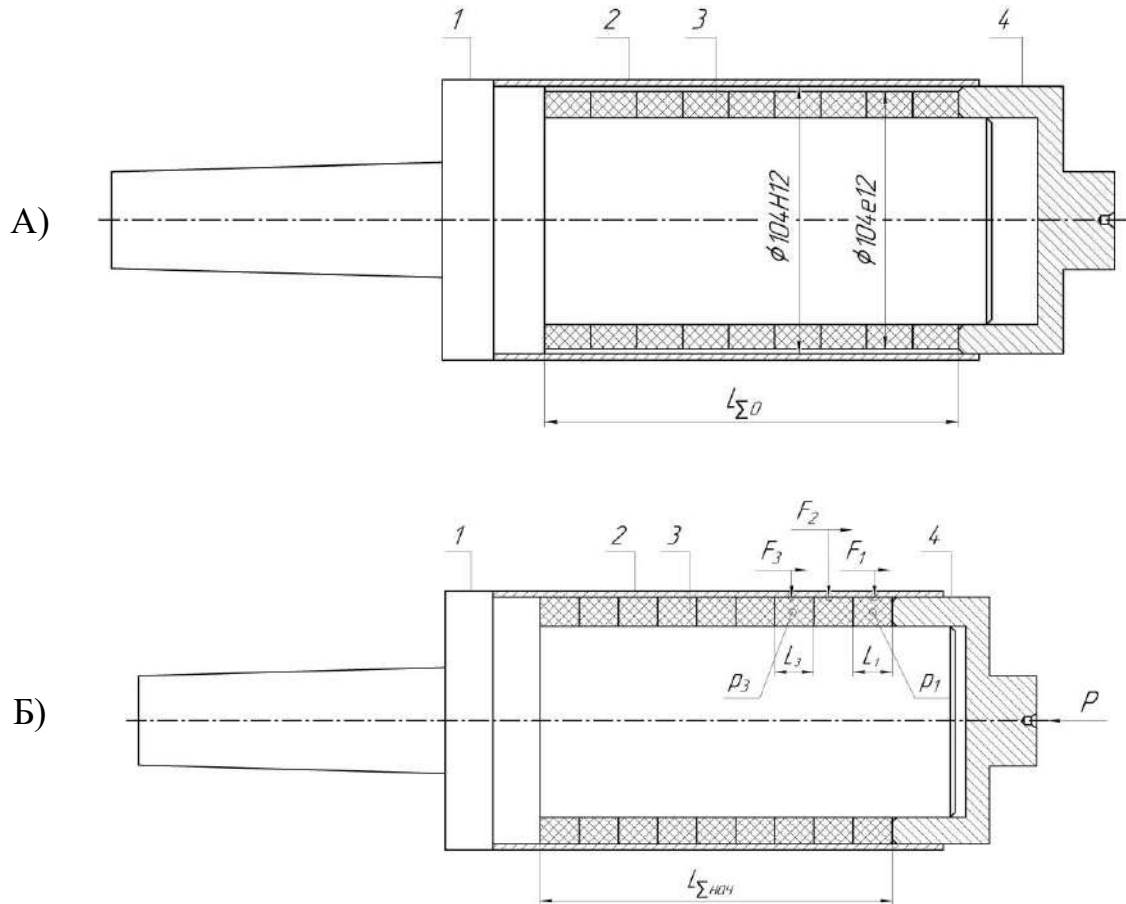


Рисунок 3.12 – Гипотетическая схема распределения давления в системе упругоэластичная вставка - втулка: А – без осевой нагрузки,

Б – под воздействием осевой нагрузки

На втором кольце по аналогии получим:

$$p_2 = \frac{P - F_1}{S}, \quad F_2 = f\pi R l_2 p_2. \quad (3.28)$$

На третьем

$$p_3 = \frac{P - (F_1 - F_2)}{S}. \quad (3.29)$$

И на произвольном кольце давление будет определяться формулой:

$$p_i = \frac{P - \sum_{i=1}^{i-1} F_i}{S}, \quad (3.30)$$

где i – номер кольца.

Выдвинутая гипотеза, описываемая формулой (3.30), может быть справедлива при выполнении условий упругой деформации и соблюдении закона Гука, то есть при одноосном нагружении эластичной вставки во втулке [105].

3.3 Сжатие эластичного вкладыша в замкнутом объеме

3.3.1 Экспериментальное определение характера деформации эластичного вкладыша в замкнутом объеме

Для определения деформации от сил закрепления был поставлен упрощенный эксперимент на стальной втулке в масштабе 1:5, (рис. 3.13, 3.14).

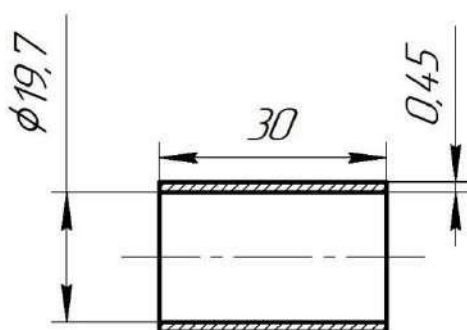


Рисунок 3.13 - Эскиз втулки

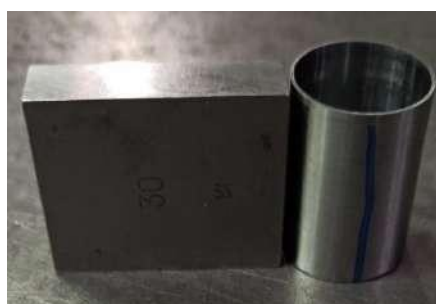


Рисунок 3.14 - Фото втулки рядом с концевой мерой длины

Торец стальной втулки прижали к неподвижной губке тисков, внутрь втулки поместили 3 вставки из резины 1Н-1ТМКЩ-С-10 ГОСТ 7338-90. Осевой зажим обеспечивался через пуансон перемещением подвижной

губки. Сила закрепления регулировалась с помощью динамометрического ключа *Matador uno* с контролируемым моментом 10-100 нм [133].

Из работы [41] известно:

$$M = r_{cp} Q \operatorname{tg}(\alpha + \rho) + M_{mp}, \quad (3.31)$$

где M – это общий момент на рукоятке динамометрического ключа,

r_{cp} – средний радиус в резьбе,

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{P}{\pi d_2}, \quad (3.32)$$

$\rho = \operatorname{tg}\varphi_{mp} \approx 0.1$ для стали по стали и стали по чугуну. В источнике [81] находим для трапецеидальной резьбы $\alpha=30^\circ$ и $f'=1,04f$, т.е. для стали и чугуна $f'=0,104$.

$M_{тр}$ – момент на торце гайки или винта (на опорном торце винта)

$$M_{mp} = \frac{1}{3} f Q \frac{D^3 - d^3}{D_{on}^2 - d_{on}^2}, \quad (3.33)$$

где D и d – большой и малый диаметры опорной поверхности винта.

Из формулы (3.31) получаем

$$Q = \frac{M - M_{mp}}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \rho)}, \quad (3.34)$$

где

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{P}{\pi d_2},$$

$\rho = \operatorname{tg}\varphi_{mp} \approx 0.1$ для стали по стали, это к-т трения.

Подставляя в формулу (3.34) значение $M_{тр}$, получаем

$$Q = \frac{M}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \rho)} - \frac{f Q (D^3 - d^3)}{r_{cp} \operatorname{tg}(\alpha + \rho) 3(D^2 - d^2)}, \quad (3.35)$$

Или, перенеся выражение: $r_{cp}tg(\alpha + \rho)$ в левую часть уравнения, получим

$$Qr_{cp}tg(\alpha + \rho) = M - Q \frac{f(D^3 - d^3)}{3(D^2 - d^2)}. \quad (3.36)$$

откуда

$$Qr_{cp}tg(\alpha + \rho) + Q \frac{f(D^3 - d^3)}{3(D^2 - d^2)} = M, \quad (3.37)$$

тогда

$$QK_1 + QK_2 = M \quad \text{или} \quad Q(K_1 + K_2) = M, \quad (3.38)$$

откуда получаем окончательную формулу

$$Q = \frac{M}{(K_1 + K_2)}, \quad (3.39)$$

где $K_1 = r_{cp}tg(\alpha + \rho)$, $K_2 = \frac{f(D_{on}^3 - d_{on}^3)}{3(D_{on}^2 - d_{on}^2)}$ - постоянные числа для конкретного механизма.

механизма.

В нашем случае применен винт трапецеидальный KTS Tr 16x4 правый. Параметры трапецеидальных резьб показаны в таблице. (См. Приложение П.1.3).

Диаметры опорной части винта $D_{on}=24$ мм, $d_{on}=16$ мм. Тогда $K_2 = \frac{f(D_{on}^3 - d_{on}^3)}{3(D_{on}^2 - d_{on}^2)} = \frac{0,103 \cdot 9728}{3 \cdot 320} = 9,394$ мм. $r_{cp}=7$ мм, $tg\alpha = \frac{P}{\pi d_2} = \frac{4}{\pi \cdot 14} = 0,091$,

$\alpha = \arctg 0,091 = 0,091$.

Тогда $K_1 = r_{cp}tg(\alpha + \rho) = 7 \times tg(0,191) = 7 \times 0,193 = 1,351$ мм. И переводной коэффициент момента в осевую силу для наших тисков составит $K = 1/(1,351 + 9,394) = 1/10,745 = 0,093$ [1/мм], а сама сила нажатия будет определяться формулой

$$Q = M \cdot K [\text{Н}\cdot\text{мм}/\text{мм}] = 1000M \times 0,099 [\text{N}]. \quad (3.40)$$

Перемещение подвижной губки измерялось с помощью индикатора часового типа. Изменения диаметра стальной втулки измерялось в двух плоскостях и в трех различных точках для каждой плоскости при каждой ступени приложения силы зажима (рис 3.15).

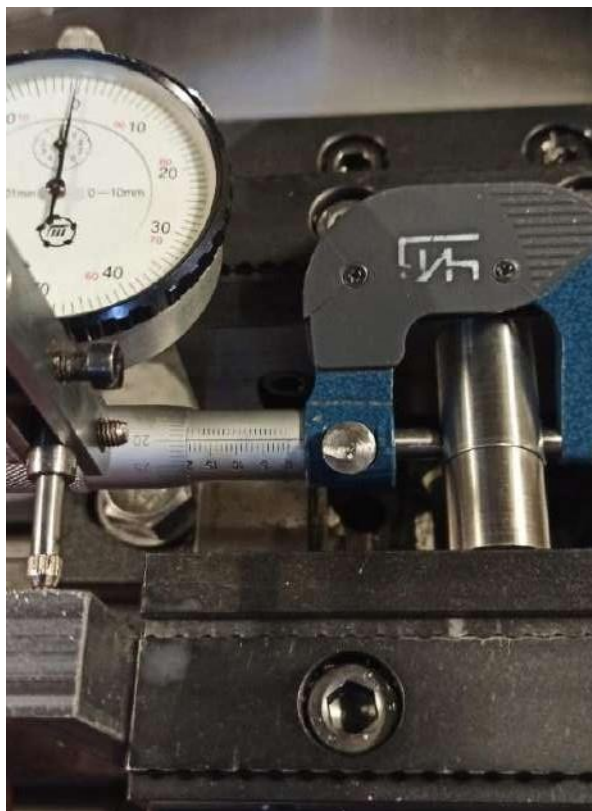


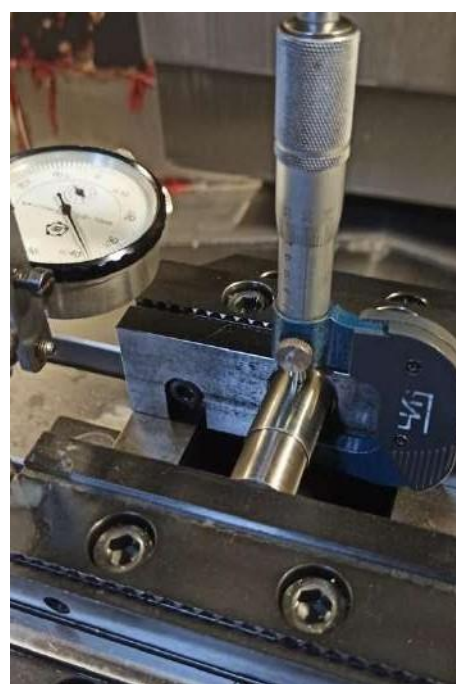
Рисунок 3.15 - Фото проведения эксперимента

Радиус кольца: $(19,7-0,9)/2=9,4$ мм. Площадь резиновых колец составила $277,45 \text{ мм}^2$. Момент на ключе переводили в силу по зависимости (3.42).

На рис. 3.16 ÷ 3.18 представлены фото проведения эксперимента в соответствии с номерами опытов. Результаты эксперимента занесены в табл. 3.3.

Таблица 3.3 - Результаты эксперимента

№ опыта	Момент на рукоятке, N·m	Сила зажима, Н	Давление, МПа	Перемещение, мм	Замеры в горизонтальной плоскости, мм			Замеры в вертикальной плоскости, мм		
					Торец 1	Середина	Торец 2	Торец 1	Середина	Торец 2
0				0	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7	19,7
1	10	990	3,57	0,68	19,67	19,67	19,67	19,73	19,73	19,73
2	15	1485	5,72	1,38	19,67	19,67	19,67	19,73	19,73	19,8
3	20	1980	7,15	1,95	19,67	19,71	19,73	19,84	19,73	19,7
4	40	3960	14,27	2,3	19,67	19,74	19,79	19,75	19,71	19,65
5	50	4950	17,87	3,9	19,67	19,8	19,84	20,05	19,6	19,6
6	55	5940	21,44	4,8	19,67	19,87	19,94	20,2	19,64	19,55

Рисунок 3.16 - Опыт 1: $Q=990$ Н Рисунок 3.17 - Опыт 2: $Q=1485$ Н

Видно, что размеры меняются несистемно: максимальные значения встречаются как при максимальных нагрузках, так при других значениях силы нажима. То же относится и к минимальным значениям сил.

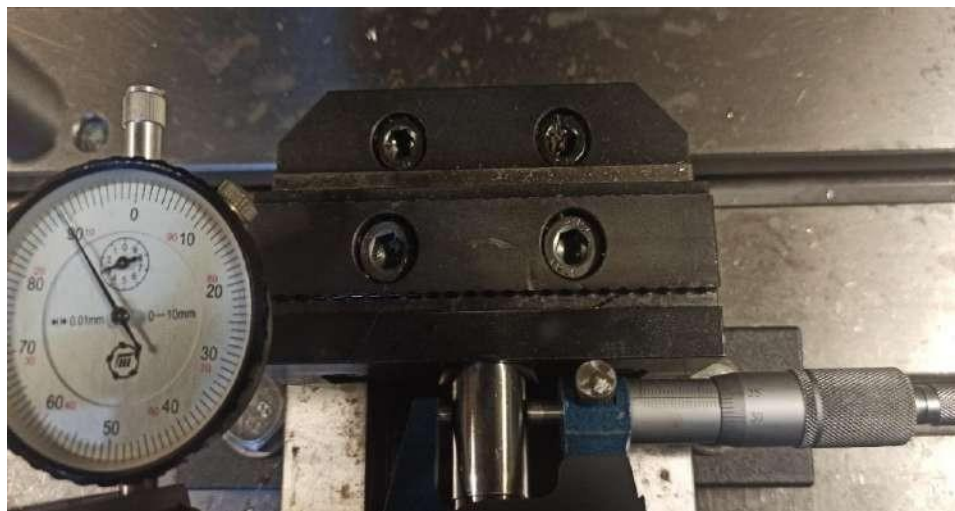


Рисунок 3.18 - Опыт 5: $Q=4950$ Н

В опыте 1 в горизонтальной плоскости размеры уменьшились на 0,03 мм, а в вертикальной увеличились на те же 0,03 мм. Образовалась овальность поперечного сечения. В опыте 2 погрешности остались на прежнем уровне. В опыте 4, при максимальной жесткости системы размеры начинают искажаться. В опыте 5 овальность в вертикальной плоскости достигает 0,45 мм, увеличиваясь в опыте 6 до 0,65 мм.

Критическое давление в опыте составило $3960\text{Н}/277,45 \text{ мм}^2 = 14,27 \text{ Н/мм}^2 = 142,7 \text{ кГ/см}^2 = 14,27 \text{ МПа}$. Как видно из данных опыта 4, жесткость системы принимает наибольшее значение, начинают деформироваться торцы втулок. При дальнейшем увеличении силы нажима, резина приобретает свойства жидкости и при давлении 14,27 МПа, в образовавшиеся из-за деформации зазоры в стыке (втулка - опорная поверхность тисков) начинает вытекать резина (рис. 3.19).

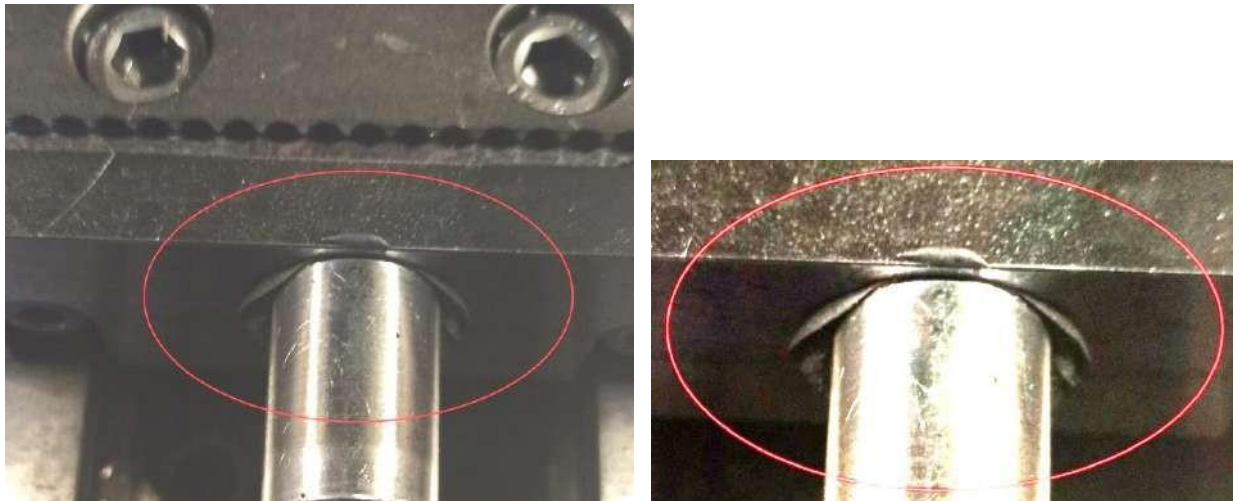


Рисунок 3.19 - Опыт 6: $Q=5940$ Н. Деформация втулки: выдавливание резинового наполнителя при давлении выше 14,27 МПа

Результаты опыта подтверждают трехосный характер нагружения и деформации резиновой вставки в замкнутом объеме, а также идентичность резины по несжимаемости техническим жидкостям.

Если предположить, что при проведении упрощенного эксперимента в масштабе 5:1 на втулку воздействовали с давлением в 5 раз больше, чем на действительную заготовку, тогда полученные данные можно подставить в виде таблицы 3.4.

Таблица 3.4 – Пересчет результатов эксперимента

№ опыта	Сила зажима, в упрощенном эксперименте Н	Давление в МПа	Предполагаемое давление в МПа
1	990	3,57	0,7
2	1485	5,35	1,07
3	1980	7,14	1,42
4	3960	14,27	2,85
5	4950	17,84	3,57
6	5940	21,41	4,28

Для апробации упомянутой гипотезы в расчет рассмотрен участок сжатия резиновых шайб от 0 до 3 мм (табл. 3.5).

Таблица 3.5 - Результаты сопоставления упругих деформаций резиновых шайб в замкнутой втулке

Перем., мм	Торец 1				Торец 2			
	В гориз. Плоск.	В вертик. Плоск.	Среднее значение	Средняя прибавка	Средняя прибавка	Среднее значение	В гориз. Плоск.	В вертик. Плоск.
0	21,84	21,84	21,84	0	0	21,835	21,84	21,83
1	22,00	22,00	22	0,16	0,09	21,925	21,90	21,95
2	22,15	22,10	22,125	0,285	0,17	22,005	22,01	22,00
3	22,21	22,17	22,19	0,35	0,34	22,175	22,2	22,15

3.3.2 Аналитическое описание трехосного сжатия эластичных колец

Трехосное сжатие, например, представляет собой случай осевого нагружения эластичной прокладки в жестком гнезде с размерами, равными наружным размерам образца. Полиуретан или резину можно рассматривать как совершенно несжимаемое тело, у которого коэффициент Пуассона $\mu=0,5$ [3, 53, 57, 123,127]. Величина, обратная коэффициенту сжимаемости, называется объемным модулем упругости жидкости $K = 1/\rho\mu$. Для минеральных масел объемный модуль упругости $K = (13,5 - 17,5) 10^8 \text{ Н/м}^2$, а для воды $K = 21 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$.

При трехосном сжатии эластичных колец внутри тонкостенной трубки возможно увеличение её диаметра [131]. Так для втулки диаметром D [мм] и толщиной стенки t [мм] (рис. 3.20), с модулем упругости материала E [Па] и коэффициентом Пуассона μ , при давлении P [Па] получим напряжение растяжения в стенках

$$\sigma = \pi D / 2t, \quad (3.41)$$

и радиальные перемещения точек трубы:

$$\Delta D = \frac{D}{2E} \times \left(\frac{PD}{2t} - \frac{\mu PD}{4t} \right). \quad (3.42)$$

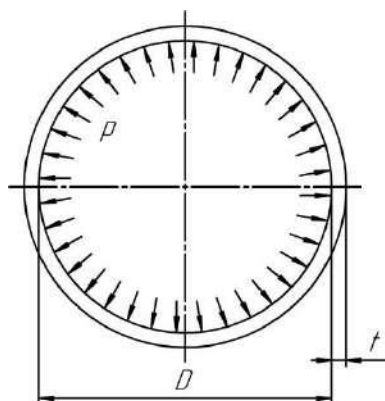


Рисунок 3.20 – Расчетная схема упругой деформации стенок втулки при трехосном сжатии эластичных колец

Очевидно, что при наличии растягивающих напряжений по окружности тонкостенной втулки, её диаметр будет пропорционально увеличиваться.

3.3.3 Экспериментальная проверка распределения давления по длине оправки

Для определения характера распределения давления при сжатии резиновых колец в замкнутой втулке, был поставлен упрощенный эксперимент на стальной втулке в масштабе 1:5 (рис. 3.21).

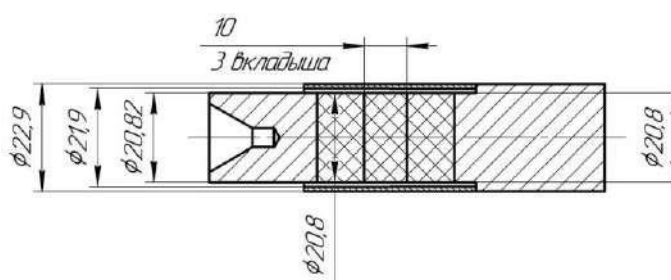


Рисунок 3.21 – Стальная втулка с резиновым вкладышем и запирающими плунжерами

Внутрь втулки вставили 3 шайбы из резины 1Н-1ТМКЩ-С-10 ГОСТ 7338-90 толщиной $l_i = 10$ мм. На комплект шайб воздействовали двумя плунжерами, заходящими внутрь втулки на 2 мм: левым, с центровым

отверстием, на который воздействовали подвижной пинолью с центром, и правым, неподвижно закрепленным в патроне станка.

Перемещение пиноли задней бабки измерялось с помощью индикатора часового типа (рис. 3.22).



Рисунок 3.22– Экспериментальная установка для определения радиальной деформации стальной втулки при сжатии пакета резиновых шайб осевой нагрузкой

В эксперименте изменения диаметра стальной втулки измеряли в двух плоскостях и в трех различных точках для каждой плоскости (рис 3.23).

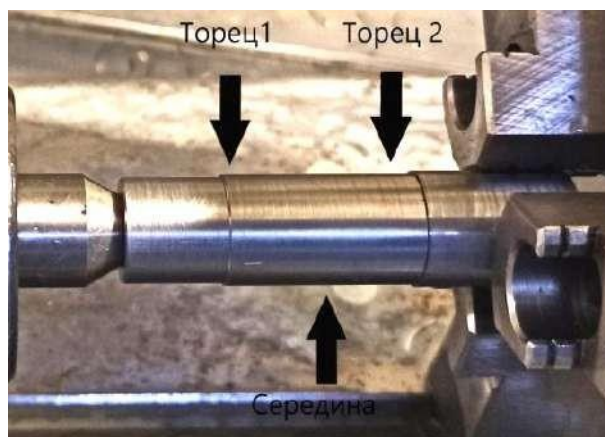


Рисунок 3.23 – Схема измерения диаметра стальной втулки в двух плоскостях и в трех различных точках для каждой плоскости

Результаты эксперимента занесены в табл. 3.6

Таблица 3.6 - Результаты эксперимента по определению характера распределения давления при сжатии резиновых шайб в замкнутой втулке

Номер опыта	Перемещение, мм.	Замеры в горизонтальной плоскости в мм			Замеры в вертикальной плоскости в мм		
		Торец 1	Середина	Торец 2	Торец 1	Середина	Торец 2
0	0	21,84	21,85	21,84	21,84	21,82	21,83
1	1	22,00	22,20	21,90	22,00	22,16	21,95
2	2	22,15	22,55	22,01	22,10	22,48	22,00
3	3	22,21	22,95	22,2	22,17	23,02	22,15
4	4	22,15	23,38	22,17	22,14	23,35	22,08
5	5	22,08	24,02	22,09	22,11	23,90	22,06
6	6	22,20	24,3	22,14	22,21	24,35	22,10
7	7	22,21	24,80	22,14	22,21	24,80	22,13

Из опытных данных (табл. 3.6) видно, что при перемещении ближней шайбы до 3 мм, происходит постепенное увеличение диаметра первого торца, при перемещении ближней шайбы более 3 мм, - уменьшение диаметра первого торца. Это естественно, так как зона деформации выходит за зону измерения диаметров микрометром.

Из анализа таблицы 3.6, можно сделать вывод, что центральная часть втулки наиболее подвержена деформациям. Об этом говорит увеличение диаметра в «средней» части цилиндра на 2,95 мм при осевом перемещении плунжера на 7 мм (рис. 3.24). При этом диаметры торцов тоже увеличиваются, но в значительно меньшей степени, и примерно одинаково. После снятия нагрузки резиновые шайбы восстановили свою форму и свободно вышли из деформированной стальной втулки.



Рисунок 3.24 – Пластически деформированная стальная втулка под действием трехосного сжатия резины при осевом перемещении подвижного плунжера на 7 мм

Очевидно, что в данном примере, деформации из упругих перешли в пластические, что открывает возможность использования полученных данных для изменения формы осесимметричных трубчатых заготовок.

Данные таблицы 3.6 и фото на рис. 3.24 подтверждают, что деформация резины в замкнутом объеме носит характер трехосного сжатия, что опровергает гипотезу о неравномерном распределении давления по длине оправки.

Если, согласно выдвинутой гипотезе о неравномерном распределении давления, нагрузить первую шайбу силой $P=1000$ Н, то при площади шайбы $S = 1,306$ см² это создаст напряжение $p_1=765,7$ Н/см². Согласно данным работ [105], коэффициент трения резины по стали имеет значения $f = 0,89 \div 1,03$. для приблизительных расчетов приняли $f = 1$. Тогда при её контакте со сталью согласно формуле (3.32) возникнет сила трения, $F_{1рез} = f\pi Rl_1 p_1 = 1 \times \pi \times 10,4 \times 1 p_1 = 2601$ Н, что превышает значение приложенной к первой шайбе осевой силы.

Коэффициент трения полиуретана по стали имеет значения $f = 0,4 \div 0,5$ [60] Для приблизительных расчетов приняли $f = 0,45$.

Тогда $F_{1m} = f\pi Rl_1 p_1 = 0,45 \times \pi \times 10,4 \times 1 p_1 = 1171,5 \text{ Н}$, что также превышает значение силы $P=1000 \text{ Н}$.

В обоих случаях (для резины и полиуретана) давление не должно передаваться, согласно упомянутой гипотезе (см. пункт 3.2.5), дальше первой шайбы, однако по экспериментальным данным (см. табл. 3.6) – это не так.

На рис. 3.25 показаны столбчатые диаграммы деформации стальной втулки под действием трехосного сжатия резины.

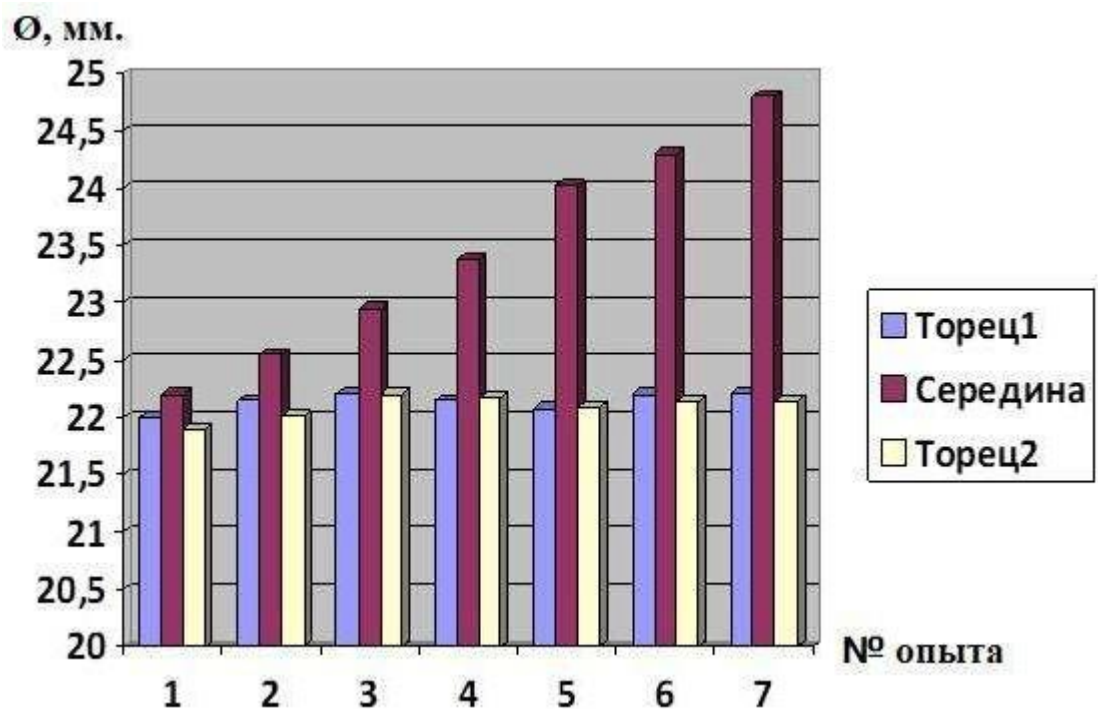


Рисунок 3.25 - Диаграмма деформации стальной втулки под действием трехосного сжатия резины

По результатам экспериментов построены графики зависимости изменения средних значений диаметров на торцах втулки (рис. 3.26)

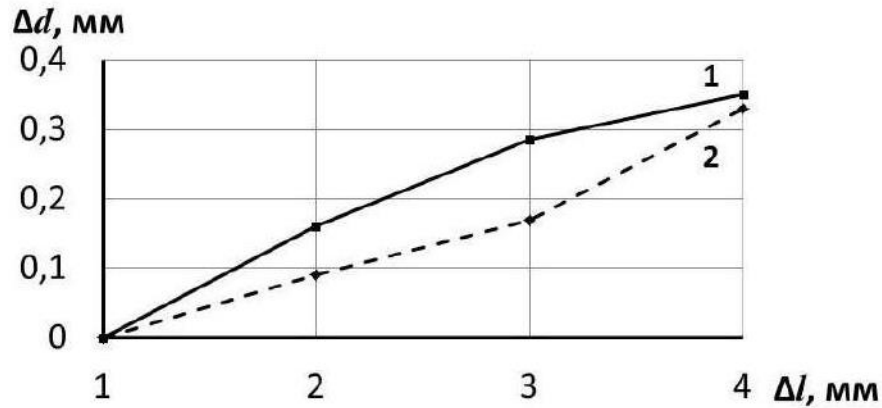


Рисунок 3.26- Графики зависимости изменения средних значений диаметров на торцах втулки: 1 - на ближнем торце, 2 - на дальнем торце

Данные таблицы 3.6 и фото на рис. 3.24 подтверждают, что деформация резины в замкнутом объеме носит характер трехосного сжатия, что опровергает гипотезу о неравномерном распределении давления по длине оправки.

Из данных табл. 3.6 и рис. 3.26 видно, что изменения средних значений диаметров на ближнем торце втулки (линия 2) несколько превышают изменения средних значений диаметров на дальнем торце, но имеют один порядок.

Там же [60] утверждается, что при невозможности дальнейшего увеличения наружного диаметра резиновой вставки при контакте с внутренней поверхностью стальной втулки схема нагружения переходит в трехосную.

Дальнейшие теоретические рассуждения затруднены вследствие специфических механических свойств упругопластических материалов и неопределенности значения коэффициента трения. Для разрешения этого противоречия было принято решение провести физическое моделирование исследуемого процесса.

3.4 Разработанная оправка для закрепления тонкостенных цилиндрических втулок

Оправка с повышенной виброустойчивостью представляет собой конструкцию (рис. 3.27, рис 3.28), состоящую из оправки – **1**, упругоэластичной вставки выполненной из полиуретана - **2**; прижимной крышки - **4**, в которой имеются 3 отверстия М8; и шайбы - **6**, в которой сделано 3 паза.

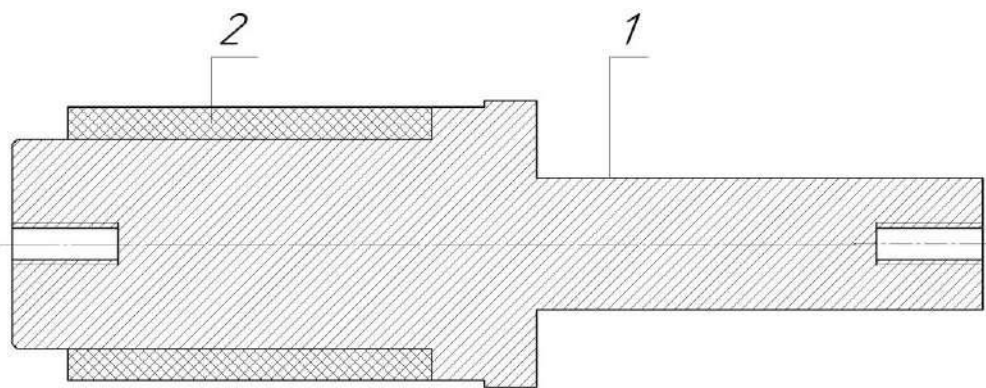


Рисунок 3.27 - Схема оправки с повышенной виброустойчивостью

Данная оправка **1** крепится к делительной головке станка (рис. 3.28).

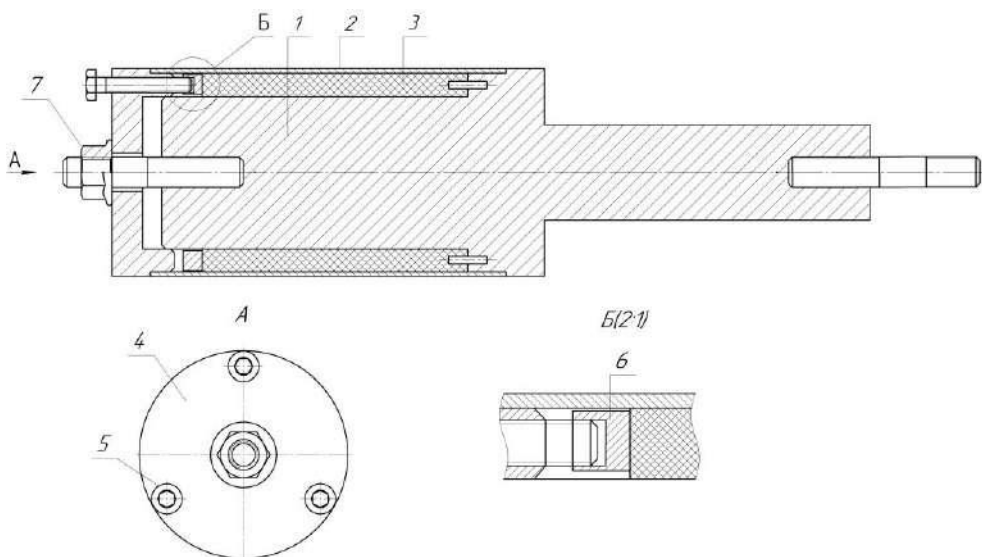


Рисунок 3.28 – Схема крепления оправки к делительной головке станка

Обрабатываемая втулка 2 садится на упругоэластичную вставку 3, выполненную из полиуретана и упирается в торец. С помощью прижимной крышки 4 фиксируется другой торец и втулки и осуществляется ее центрирование. После закручивание трех болтов -5, шайба - 6 упирается в упругоэластичную вставку и разжимает ее. При закреплении втулки 2 на станок для ее обработки, силу затяжки зажимных винтов 5 и гайки 7 необходимо контролировать при помощи динамометрического ключа, на котором предварительно выставлена необходимая нагрузка.



Рисунок 3.29 – Оправка с повышенной виброустойчивостью

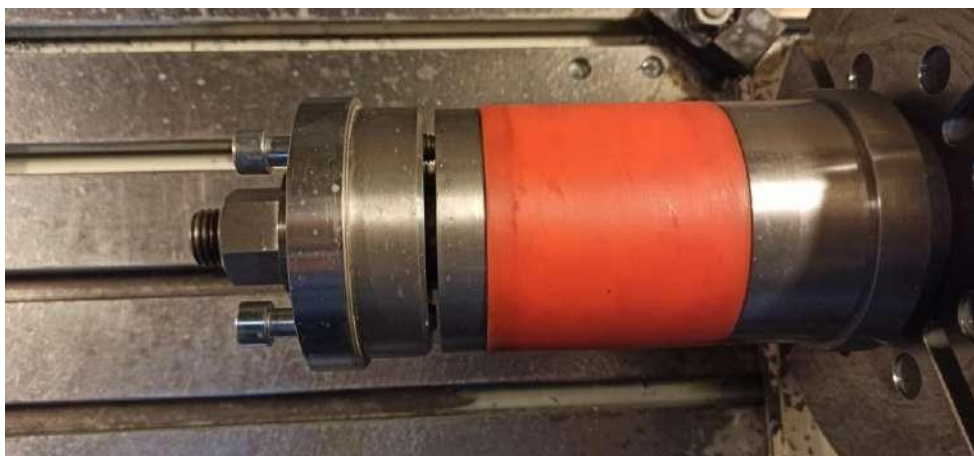


Рисунок 3.30 - Фото оправки по патенту [9], установленной в поворотной оси фрезерного станка

Технические характеристики полиуретана представлены в Приложении П.1 (Таблица П.1.4).

С учетом проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработаны оправки для базирования тонкостенных втулок с внутренним диаметром 194 мм. (рис. 3.29) и с внутренним диаметром 104 мм. (рис. 3.30).

Выводы к главе 3

1. Высокий коэффициент гистерезисных потерь полиуретана ($\eta = 0,37-0,52$) и резины ($\eta=0.05-2$) существенно выше, чем у остальных материалов, что способствует их применению в виброгасящих приспособлениях.

2. При осевом нагружении упругоэластичной вставки в жестком гнезде с размерами, равными наружным размерам образца, получаем эффект трехосного сжатия, при котором упругоэластичная вставка, не имея возможности деформироваться по двум остальным осям, ведет себя как малосжимаемый материал, аналогично жидкости.

3. Проведение упрощенного опыта, когда нажатие на резину пуансоном, установленным в тонкостенной стальной втулке, с помощью слесарных тисков показало:

А) Размеры поперечных сечений меняются несистемно: максимальные значения встречаются как при максимальных нагрузках, так при других значениях силы нажима.

Б) При достижении давления в опыте 14,27 МПа жесткость системы принимает наибольшее значение, начинают деформироваться торцы втулок.

В) При дальнейшем увеличении силы нажима, жесткость системы падает до уровня $1288 \div 1238$ Н/мм, после чего резина приобретает свойства жидкости и в образовавшиеся из-за деформации зазоры в стыке (втулка опорная поверхность тисков) начинает вытекать из стальной втулки. При

снятии нагрузки образец частично восстанавливается и остается только та часть деформации, которая возникла за счет холодного течения.

Г) Результаты опыта подтверждают трехосный характер нагружения и деформации резиновой вставки в замкнутом объеме, а также идентичность резины по несжимаемости техническим жидкостям.

4. С помощью известных справочных зависимостей выведены формулы для приблизительного перевода крутящего момента на рукоятке тисков и задней бабки токарного станка в осевую силу нажима пуансона на резиновую вставку. Эти формулы справедливы при выполнении условий упругой деформации и соблюдении закона Гука, то есть при одноосном нагружении резиновой вставки во втулке.

5. Формула, выведенная для приблизительного перевода крутящего момента на рукоятке тисков в осевую силу нажима пуансона, на резиновую вставку может давать существенные погрешности вычисления вследствие неоднозначности условий трения в опорной поверхности.

6. Данные уточненных экспериментальных исследований подтверждают, что деформация эластичных материалов в замкнутом объеме носит характер трехосного сжатия, что опровергает гипотезу о неравномерном распределении давления по длине оправки.

7. При трехосном сжатии эластичных колец внутри тонкостенной втулки возможно увеличение диаметра стальной втулки в пределах упругих, а затем и пластических деформаций.

8. Выведенная аналитическая зависимость (3.27) подтверждена результатами эксперимента и может быть рекомендована для расчета деформации полиуретановых втулок, применяемых в технологической оснастке.

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ВТУЛКИ В ЗАЖИМНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЯХ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

4.1 Определение радиальных перемещений стенки втулки при действии осевой силы давления на упругоэластичную вставку оправки численным моделированием

Применение метода конечных элементов для моделирования динамики деталей сложной формы при обработке фрезерованием явилось закономерным развитием концепции моделирования фрезерования [38].

В параграфе 2.2.3. настоящей диссертации было установлено, что сочетание конструктивных и технологических факторов фрезерования тонкостенной втулки сферическими фрезами, вызывает вынужденные и автоколебания стенки втулки, приводящие к образованию шероховатости, превосходящей допускаемую величину. Таким образом, для решения технологической задачи, необходимо установить максимальные значения сил закрепления втулки. Также необходимо установить оптимальную силу нажатия на упругоэластичную вставку, достаточную для поджима цилиндрической втулки, но не приводящую к ее деформациям.

Статистические исследования вычисляют перемещения, силы реакции, нагрузки, напряжения и распределения запаса прочности. Напряжение von Mises, используемое в качестве критерия отказа пластичных материалов, вычисляется на основе шести компонентов напряжения [108]:

$$vonMises = \{0.5 \times [(SX - SY)^2 + (SX - SZ)^2 + (SY - SZ)^2] + 3 \times (TXY^2 + TXZ^2 + TUX^2)\}^{(1+2)} \quad (4.1)$$

Для определения максимальной силы закрепления втулки, при которой не будет происходить ее деформации, был проведен статический анализ втулки с помощью метода конечных элементов в программном комплексе

SolidWorks (рис. 4.1 и 4.2). Был смоделирован опыт, когда правая часть втулки закреплена неподвижно, а на левый край воздействовали силой закрепления.

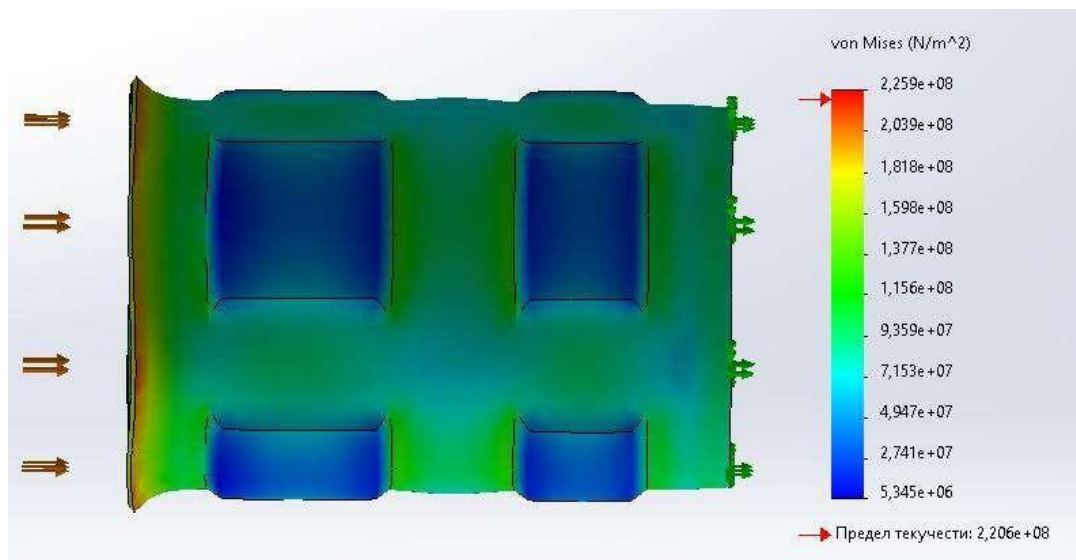


Рисунок 4.1 – Эпюра напряжения при силе закрепления 75 000 Н

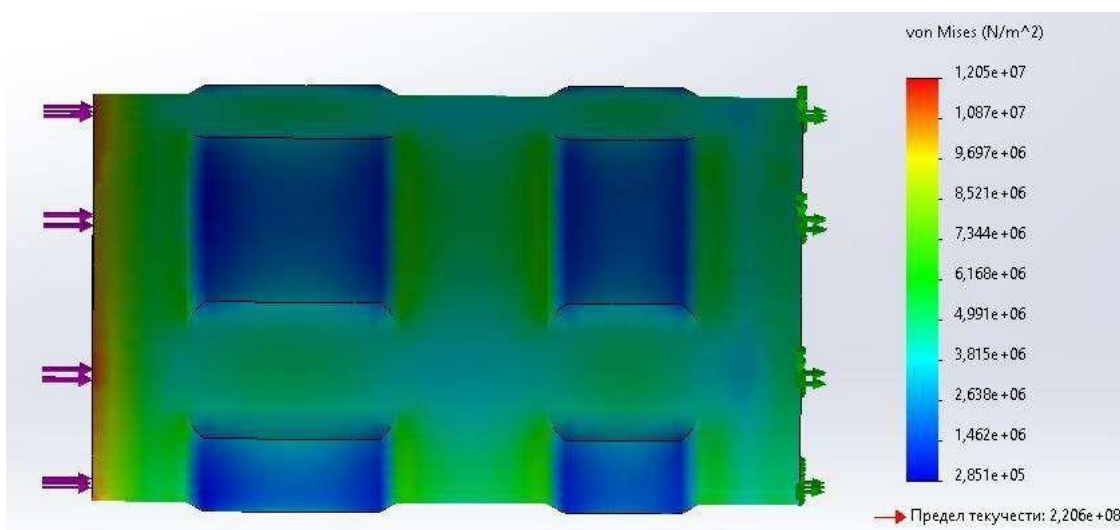


Рисунок 4.2 – Эпюра напряжения при силе закрепления 4000 Н

Согласно анализу, втулка достигает предела текучести, а, следовательно, деформации при силе закрепления 75 000 Н. Эквивалентные напряжения по Von Mises составляют $2,039e+08$ N/m². При этом предел текучести стали 30 составляет $2,206e+08$ N/m² (см. рис 4.1)

Исходя из опытных данных, было принято решение осуществлять закрепление втулки с силой, равной 4000 Н. Как показывает статический анализ (рис. 4.2) это не приводит к каким-либо деформациям втулки.

Для сравнения напряжений втулки в зажатом состоянии в оправке, используемом на производстве, и в разработанной оправке с повышенной виброустойчивостью [95], был применен статический анализ с помощью метода конечных элементов.

Была смоделирована 3D модель спроектированной оправки. На рисунке 4.3 показано: 1 – втулка, гайка – 2, зажимная крышка -3, распорная шайба – 4, упругоэластичная вставка – 5, центральный стержень -6.

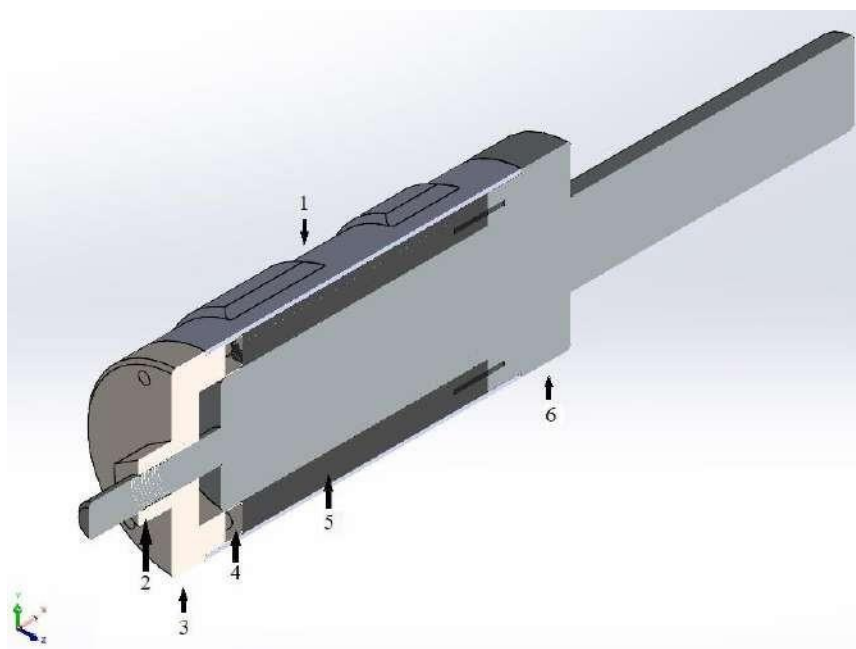


Рисунок 4.3 – 3D модель спроектированной оправки

Для проведения статического анализа модель была упрощена. Из анализа были исключены гайка и распорная шайба. Розовыми стрелками показана нагрузка, действующая на зажимную крышку, зелеными стрелками - на упругоэластичную вставку (Рис. 4.4).

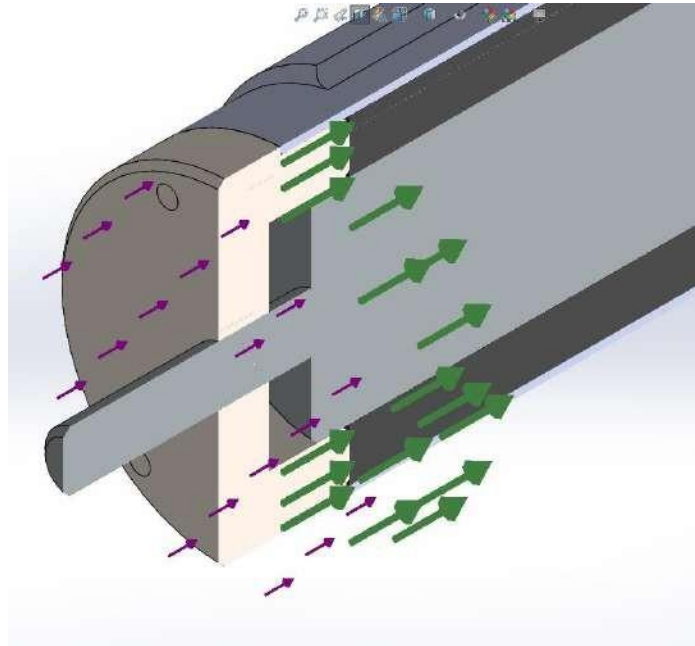


Рисунок 4.4 – Схема приложения осевых нагрузок при проведении статического анализа

В ходе статического анализа было поставлено 10 опытов. 9 опытов с воздействием на упругоэластичную вставку с силой равной 400 Н , 681 Н , 1672 Н, 4200 Н (рис. 4.5), 6300 Н, 8400Н, 16800Н, 21000Н, 23100Н (рис. 4.6), а на зажимную крышку силой, равной 4000 Н. И один опыт без эластичной втулки.

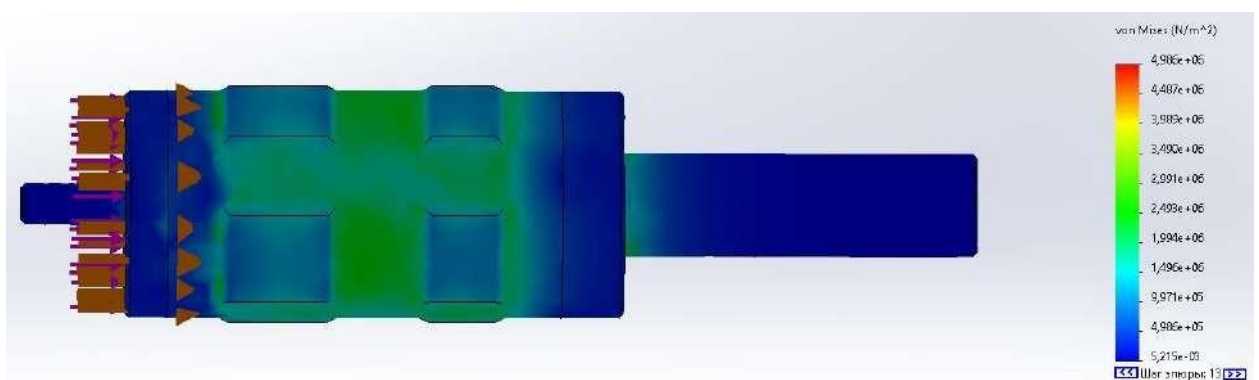


Рисунок 4.5 - Эпюра напряжения в разработанной оправке. Опыт 1

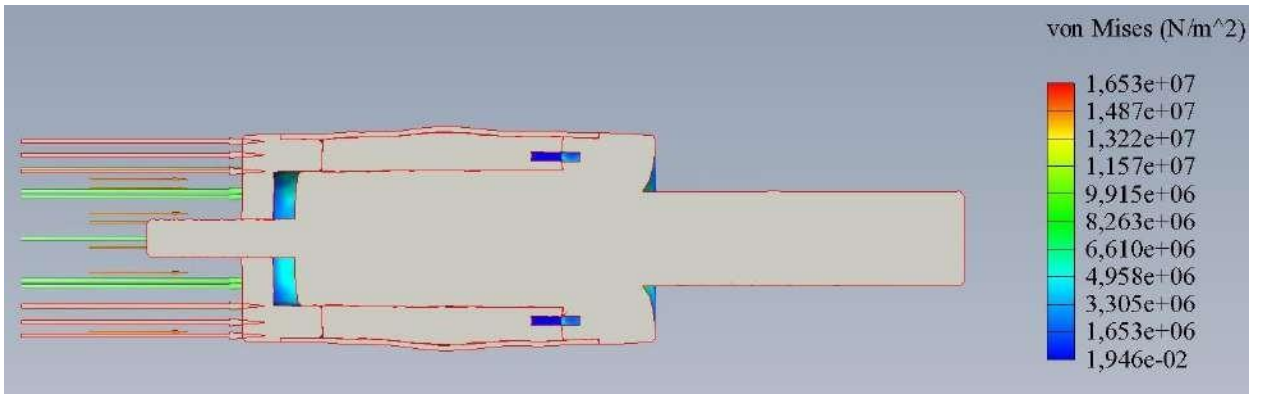


Рисунок 4.6 - Эпюра напряжения в разработанной оправке.

Опыт 6

При анализе полученных данных можно сделать вывод, что с увеличением силы, давящей на упругоэластичную вставку, происходит увеличение напряжений в центральной части втулки с $1,38 \text{ E}+06 \text{ N/m}^2$ до $8,46\text{E}+06 \text{ N/m}^2$. На основе статистических данных была составлена таблица 4.1. и построен график эквивалентных напряжений (Рис. 4.7)

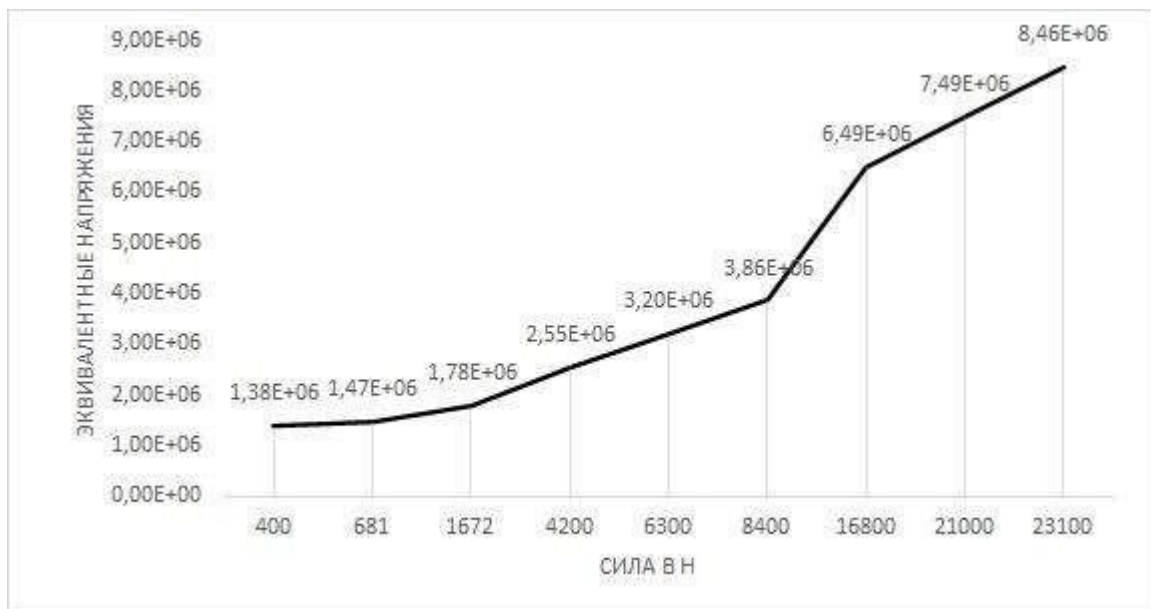


Рисунок 4.7 - График эквивалентных напряжений в центральной части втулки

Таблица 4.1 - Результаты эксперимента

№ п/п	Нагрузка на эластичную втулку, Н	Эквивалентных напряжений, N/m ²
1	0	1,36E+06
2	400	1,38E+06
3	681	1,47E+06
4	1672	1,78E+06
5	4200	2,55E+06
6	6300	3,20E+06
7	8400	3,86E+06
8	16800	6,49E+06
9	21000	7,49E+06
10	23100	8,46E+06

Для сравнения напряжений втулки в зажатом состоянии в используемом на производстве оправке был применен статический анализ с помощью метода конечных элементов (Рис. 4.8), который показал, что напряжения в центральной части втулки составляют 1,36E+06N/m².

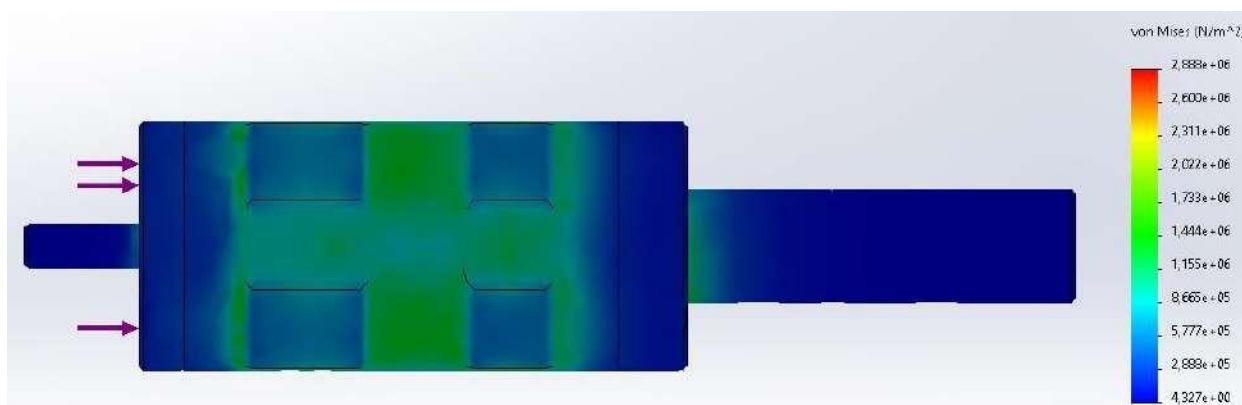


Рисунок 4.8 - Эпюра напряжения в используемой оправке

При проведении численного моделирования разработанной оправки, можно сделать вывод:

1. При закреплении детали прижимной крышкой без упругоэластичной вставки, напряжения в центральной части втулки составляют 1,36E+06 N/m².

2. При сдавливании, упругоэластичная вставка начинает оказывать давление на стенки втулки, о чем свидетельствует увеличение напряжения с $1,38E+06 \text{ N/m}^2$ до $8,46E+06 \text{ N/m}^2$. При этом предел текучести стали 30 составляет $6,2042E+08 \text{ N/m}^2$, что не может служить причиной пластического деформирования втулки.

3. Напряжение при поджиге упругоэластичной вставки с силой 400 Н уже начинает оказывать давление на стенки втулки $1,38E+06 \text{ N/m}^2 > 1,36E+06 \text{ N/m}^2$.

3. Основываясь на теоретических и экспериментальных данных, приведенных в разделе 4.1 настоящей диссертации, было определено, что оптимальной силой для закрепления втулки при помощи зажимной крышки является сила равная 4000 Н.

4. Сила, оказываемая на упругоэластичную вставку, необходимая для ее распираения и равномерного контакта с внутренними стенками цилиндра, составляет 400 Н. Установлено, что такие зажимные силы не приводят к деформации втулки.

4.2 Определение радиальных перемещений стенки оболочки при действии сосредоточенной радиальной силы

4.2.1 О возможности аналитического определение радиальных перемещений стенки длинной оболочки при действии сосредоточенной радиальной силы

Параметры оболочки заданы чертежом детали. Упругий прогиб стенки заготовки можно определить по известной методике теории упругости [63], где приведен пример: «Пусть оболочка со свободно опертыми краями находится под действием одной сосредоточенной радиальной силы Q_z , приложенной к середине оболочки (рис. 4.9).

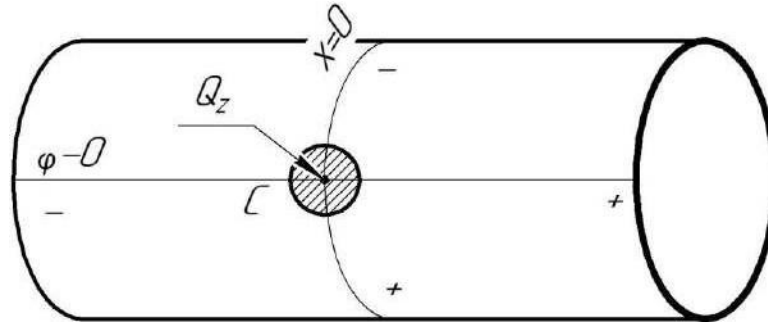


Рисунок 4.9 - Схема расчета упругой радиальной деформации оболочки

Если длина оболочки $2l \geq 2R\chi$, где $\chi = \sqrt[4]{3(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{R}{h}}$, причем $R/\chi \geq 100$, то справедлива приближенная формула [63]:

$$\omega = \frac{Q_z}{\pi E h} \left[\frac{1}{12} (2\lambda^3 - 3\lambda\xi^2 + |\xi|^3 \cos\varphi) + \chi^2 \sum_{n=2}^N \frac{n}{\sqrt{(n^2-1)^3}} \left(\cos\varphi \frac{n\sqrt{n^2-1}}{2\chi} \xi + \sin \frac{n\sqrt{n^2-1}}{2\chi} |\xi| \right) e^{-\frac{n\sqrt{n^2-1}}{2\chi} |\xi|} \cos n\varphi \right] \quad (4.2)$$

Здесь $\lambda = \frac{l}{R}$, а N – целое число, ближайшее к $\frac{\chi}{2}$; за начало координат

ξ и φ принята точка приложения силы Q_z .

В формуле (4.2) слагаемое, содержащее $\cos\varphi$, выражает прогиб оболочки как балки. Наибольшее значение $\omega = \omega(\xi, \varphi)$ имеет в точке приложения силы Q_z :

$$\begin{aligned} \max \omega = \omega(0,0) &= \left(\frac{1}{12} \lambda^3 + 0,802 \chi^3 \right) \frac{Q_z}{\pi E h} = \\ &= \left\{ \frac{l^3}{6R^3} + 0,802 \sqrt[4]{\frac{6}{3(1-\nu^2)}} \left[\frac{l}{2} \right]^3 \sqrt{\left(\frac{R}{h} \right)^3} \right\} \frac{Q_z}{\pi E h} \quad (4.3) \end{aligned}$$

Поскольку формула (2.6) для определения осевой составляющей силы резания найдена, можно, подставляя полученные значения из табл. 2.5 в

формулу (4.2), определить максимальный прогиб оболочки в месте приложения силы.

Известно решение о подкреплении нежесткой втулки [63], путем разработки конструкции оправки повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок [74, 83, 84]. В нашем случае повышение жесткости тонкой стенки втулки достигается осевым сжатием упругоэластичной вставки, помещенной в зазор между обрабатываемой втулкой и центральным стержнем оправки. Поэтому расчетная схема для аналитического определения радиальных перемещений стенки втулки при действии сосредоточенной радиальной силы (см. рис. 4.9) кардинально меняется.

Для случая, когда повышение жесткости тонкой стенки втулки достигается осевым сжатием упругоэластичной вставки, помещенной в зазор между обрабатываемой втулкой и центральным стержнем оправки, не существует известной схемы расчета, поэтому целесообразно применить численное моделирование.

4.2.2 Определение радиальных перемещений стенки втулки при действии сосредоточенной радиальной силы численным моделированием

Для определения радиальных перемещений стенки втулки при действии сосредоточенной радиальной силы, был проведен статический анализ втулки (рис. 4.10). Было смоделировано 2 эксперимента, включающих в себя по 3 опыта. При этом правая часть втулки закреплена неподвижно, а на левый край воздействовали силой закрепления равной 4000 Н.

Используя формулы (2.3) и (2.11), находим значение осевой составляющей силы резания для фрезы $P_{oc} = yC_{pN} = 2,123 \times 0,5 \times 89 = 93,41$ Н (см. табл. 2.5).

Для моделирования радиальной силы на втулку в 1 эксперименте приняли значение силы силой, равной 100 Н.

Из формулы (2.3) видно, что подача влияет на величину осевой силы в степени 0,75. Округляя степень до 1, и принимая значения подач на зуб и ход фрезы в 2 раза больше заводского варианта, приняли во втором эксперименте силу, равной 400 Н.

В первой группе опытов сила была приложена к двум «нижним» галтелям (рис. 4.11, рис 4.14),

- во второй группе опытов – к фасонной поверхности (рис. 4.12, рис 4.15),

- в третьей группе опытов - к двум верхним галтелям (рис.4.13, 4.16).

Численные выражения результатов эксперимента брались из трех случайно расположенных точек на поверхностях приложения силы.

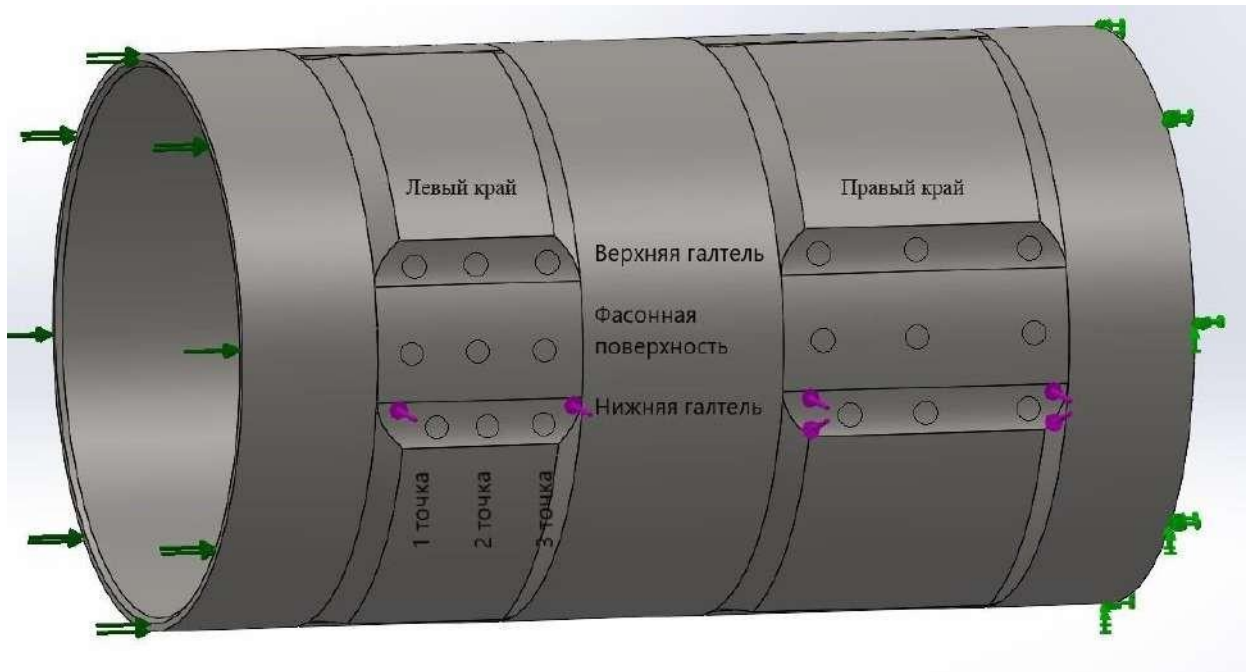


Рисунок 4.10 – Схема положения мест приложения нагрузки при проведении статического анализа

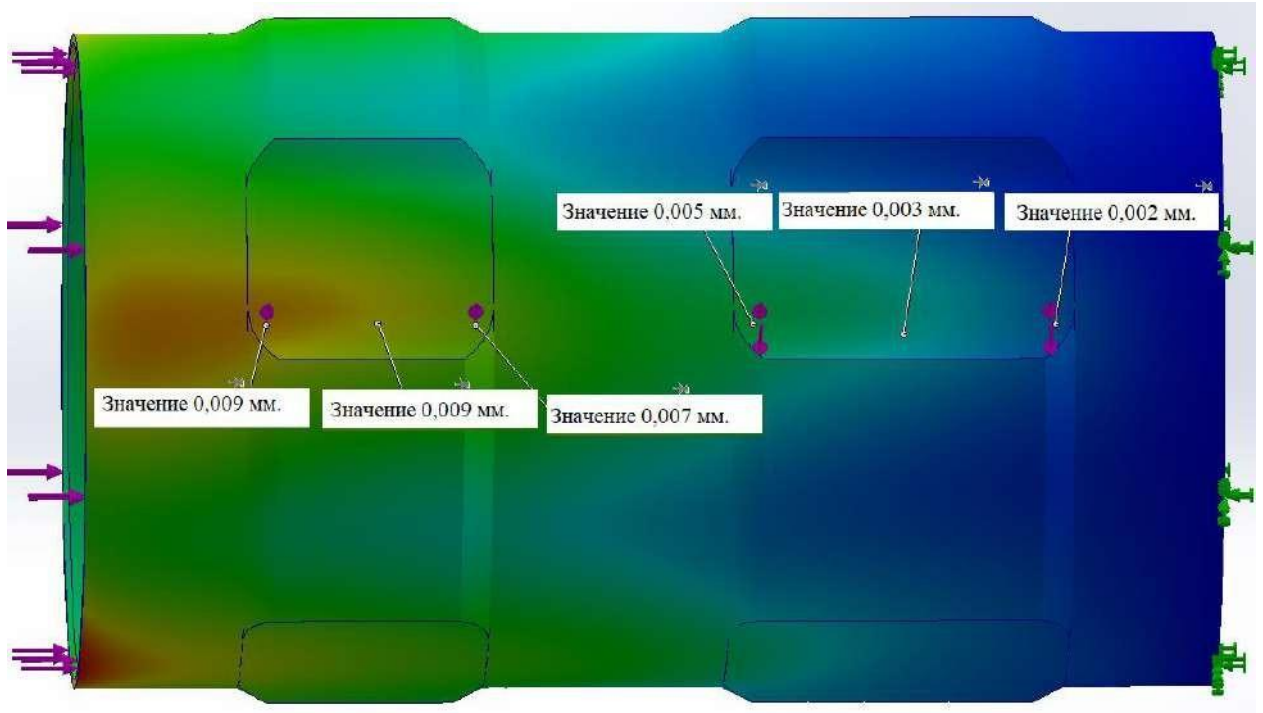


Рисунок 4.11 - Эпюра перемещений первого эксперимента, первого опыта

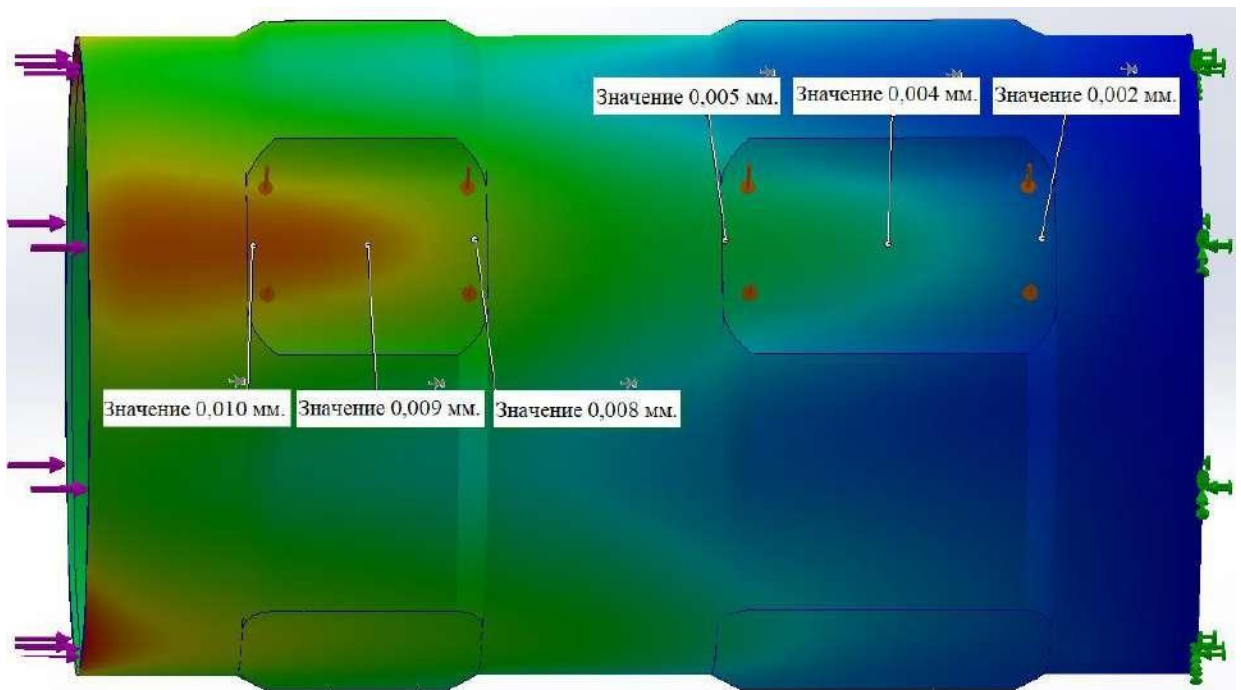


Рисунок 4.12 - Эпюра перемещений первого эксперимента, второго опыта

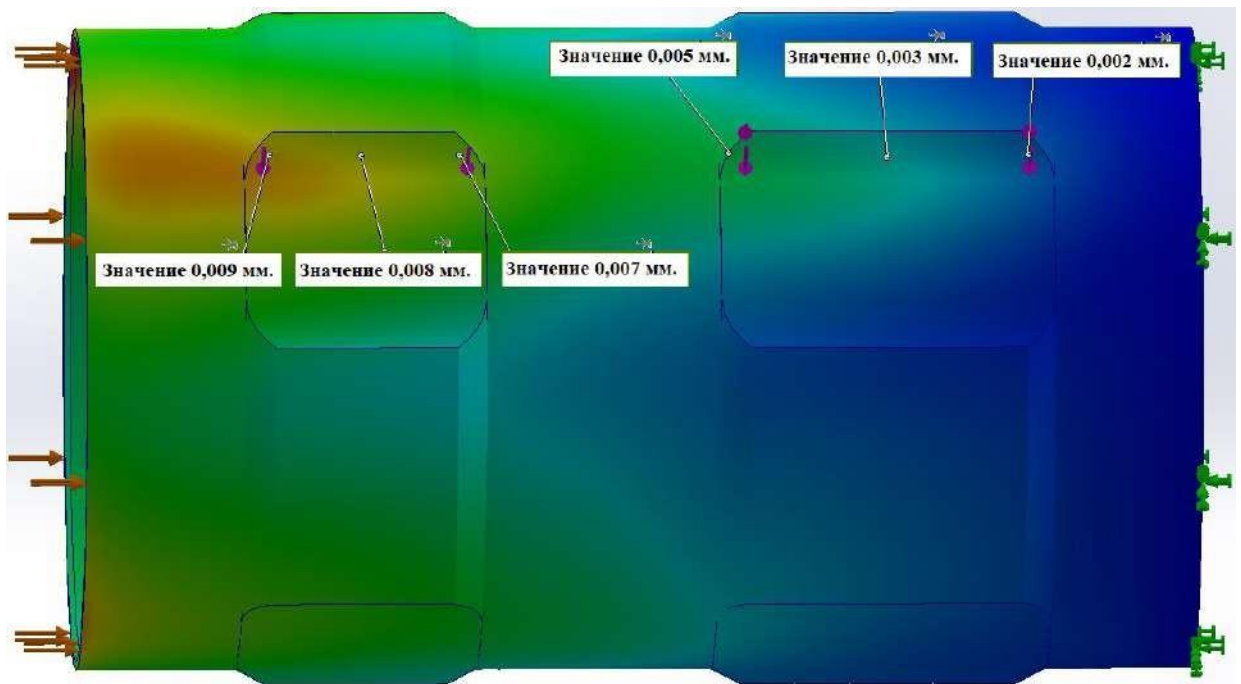


Рисунок 4.13 - Эпюра перемещений первого эксперимента, третьего опыта

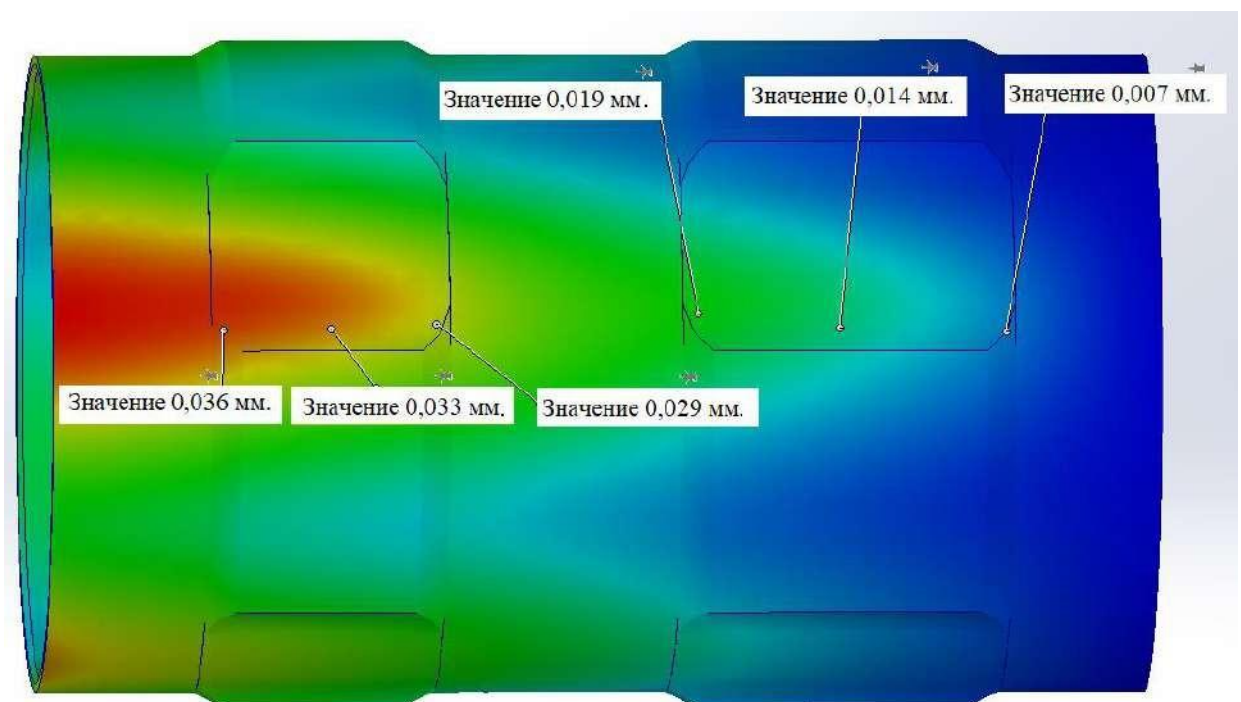


Рисунок 4.14 - Эпюра перемещений второго эксперимента, первого опыта

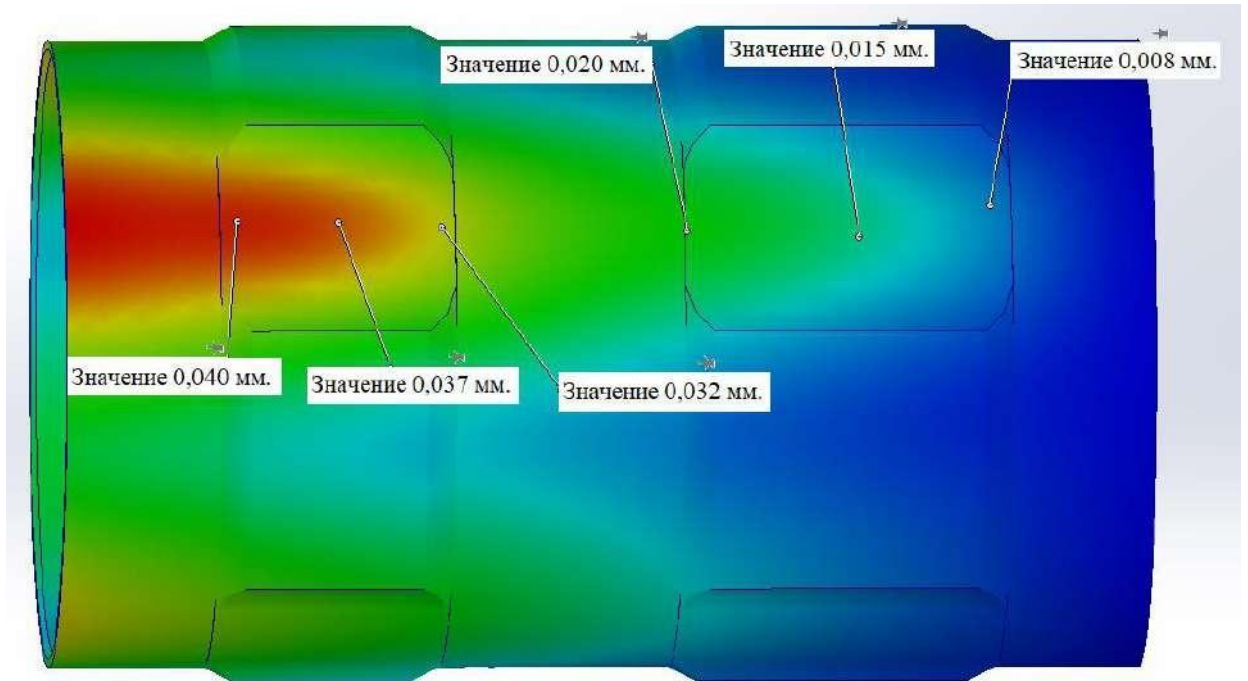


Рисунок 4.15 - Эпюра перемещений второго эксперимента, второго опыта

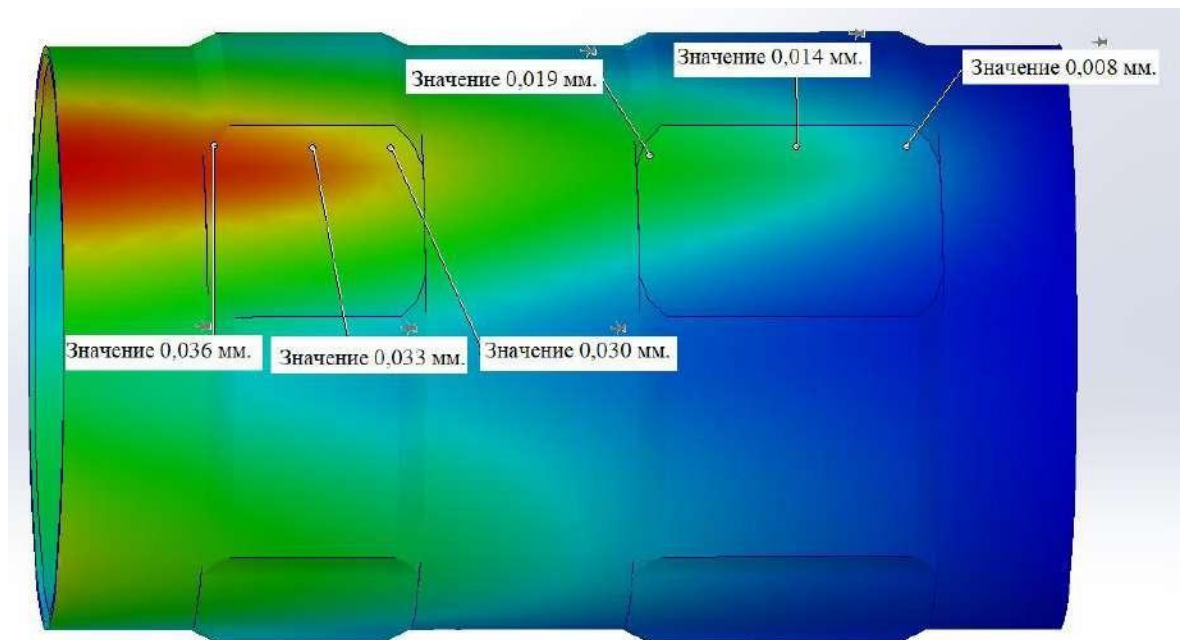


Рисунок 4.16 - Эпюра перемещений второго эксперимента, третьего опыта

Полученные результаты для первого эксперимента заносились в таблицу 4.2, для второго эксперимента в таблицу 4.3, где было посчитано среднеарифметическое перемещение для каждого элемента втулки.

Таблица 4.2 - Результаты первого эксперимента

№ П / П	Элемент оболочки	Левый край				Правый край			
		Первая точка	Вторая точка	Третья точка	Среднее значение	Первая точка	Вторая точка	Третья точка	Среднее значение
1	Нижняя галтель	0,009	0,009	0,007	0,008	0,005	0,003	0,002	0,003
2	Фасонная поверхность	0,010	0,009	0,008	0,009	0,005	0,004	0,002	0,004
3	Верхняя галтель	0,009	0,008	0,007	0,008	0,005	0,003	0,002	0,003
4	Среднее значение				0,008				0,003

Таблица 4.3 - Результаты второго эксперимента

№ П / П	Элемент оболочки	Левый край				Правый край			
		Первая точка	Вторая точка	Третья точка	Среднее значение	Первая точка	Вторая точка	Третья точка	Среднее значение
1	Нижняя галтель	0,036	0,033	0,029	0,032	0,019	0,014	0,007	0,013
2	Фасонная поверхность	0,040	0,037	0,032	0,036	0,020	0,015	0,008	0,014
3	Верхняя галтель	0,036	0,033	0,030	0,033	0,019	0,014	0,008	0,014
4	Среднее значение				0,034				0,014

Из анализа полученных данных можно сделать вывод, что в первом эксперименте радиальные перемещения стенки втулки от сил резания в левой

части составляют 0,008 мм, а в правой части втулки 0,003 мм, что определяет возможную конусообразность обработанной поверхности до 0,005 мм.

Во втором эксперименте радиальные перемещения стенки втулки под действием сил резания в левой части составляют 0,034 мм, а в правой части втулки - 0,014 мм, что определяет возможную конусообразность обработанной поверхности до 0,02 мм.

При этом, в двух проведенных экспериментах, прогибы стенки в левой части втулки имеют большие значение по сравнению с правой $0,008 > 0,003$ и $0,034 > 0,014$ (мм).

Выводы к главе 4

1. Решение статической задачи при помощи программы SolidWorks позволило определить, что:

1.1) Тонкостенная втулка имеет малую жёсткость, что негативно сказывается при его механической обработке.

1.2) При закреплении втулки в оправке, действующей на производстве, наблюдается увеличение жесткости на диаметральных поверхностях, расположенных вблизи от торцов втулки, при этом центральная часть имеет недостаточную жесткость.

1.3) При закреплении втулки на разработанной оправке наблюдается увеличение жесткости на всех диаметральных поверхностях.

2. Показано, что аналитическое определение радиальных перемещений стенки втулки при действии сосредоточенной радиальной силы выполнить практически невозможно, ввиду несоответствия схемы нагрузки втулки радиальными силами схемам, принятым в механике твердого тела.

3. Определение радиальных перемещений стенки втулки при действии сосредоточенной радиальной силы численным моделированием показало, что:

- под действием силы, равной 100 Н, радиальные перемещения стенки втулки от сил резания в левой части составляют 0,008 мм, а в правой части втулки 0,003 мм, что определяет возможную конусообразность обработанной поверхности до 0,005 мм.

- под действием силы, равной 400 Н, радиальные перемещения стенки втулки под действием сил резания в левой части составляют 0,034 мм, а в правой части втулки - 0,014 мм, что определяет возможную конусообразность обработанной поверхности до 0,02 мм.

- Поскольку к цилиндрическому участку фасонной впадины (см. рис. 1.1) требования по отклонению от цилиндричности составляют 0,1 мм, то данная конусность допустима. Частично конусность можно уменьшить путем введения коррекции в управляющую программу.

5 МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИБРАЦИЙ ВТУЛКИ

5.1 Определение собственных частот втулки

Конечноэлементная модель втулки подготовлена на основе CAD-модели при помощи программы SolidWorks (рис. 5.1).

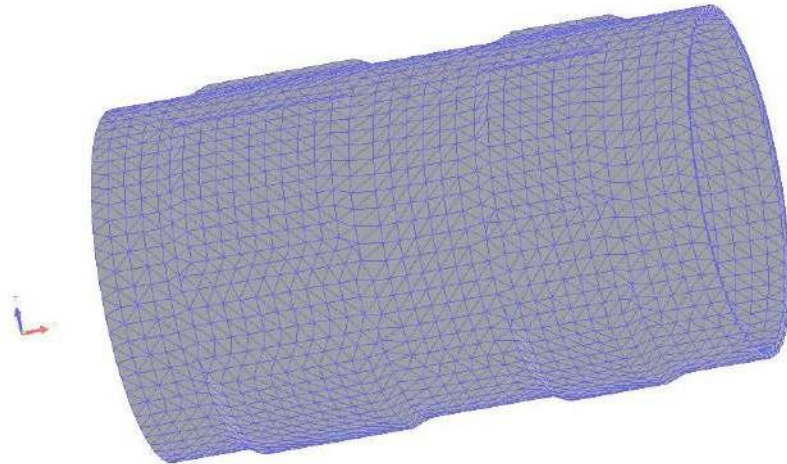


Рисунок 5.1 - Модель втулки и ее разбиение на конечные элементы

Суммируя вклады от каждого конечного элемента, получают систему линейных дифференциальных уравнений движения относительно вектора узловых перемещений всей конечно-элементной модели:

$$M_d \ddot{q} + C_d \dot{q} + K_d q = F, \quad (5.1)$$

где q - вектор узловых перемещений конечно-элементной модели;

F - вектор узловых сил;

M_d, C_d, K_d - матрицы масс, демпфирования и жесткости конструкции соответственно [33, 38].

Частотный анализ необходим, чтобы вычислить, как конструкция будет деформироваться на собственных частотах, а также позволяет вычислить количество масс детали, которая связана с этой частотой. Так же можно узнать суммарную эффективную массу для каждого направления[23].

Результаты анализа приводятся в табл. 5.1 и рис. 5.2, где отображается список коэффициентов массового участия в глобальных направлениях X , Y и Z , нормализованных относительно общей массы, после запуска частотного исследования.

Таблица 5.1 - Коэффициенты массового участия в глобальных направлениях

Режим No.	Частота (Герц)	Направление X %	Направление Y %	Направление Z %
1	1 059,8	0	0	0
2	1 203,5	0	0	0
3	1 963,4	0	19	52
4	1 963,6	0	52	19
5	2 228,7	0	0	0
6	2 231,2	0	0	0
Суммарная эффективная масса %		0	71	71

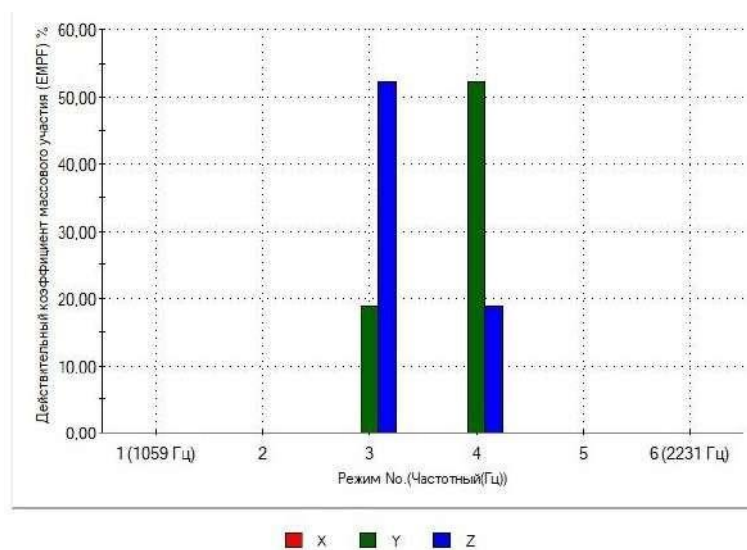


Рисунок 5.2 - График частот в сравнении с действительным коэффициентом массового участия

Из выходных данных видно, что наиболее опасными для втулки в направлении оси Z является 3 режим с частотой 1 963,4 Гц, где задействовано 52% массы втулки (рис. 5.3).

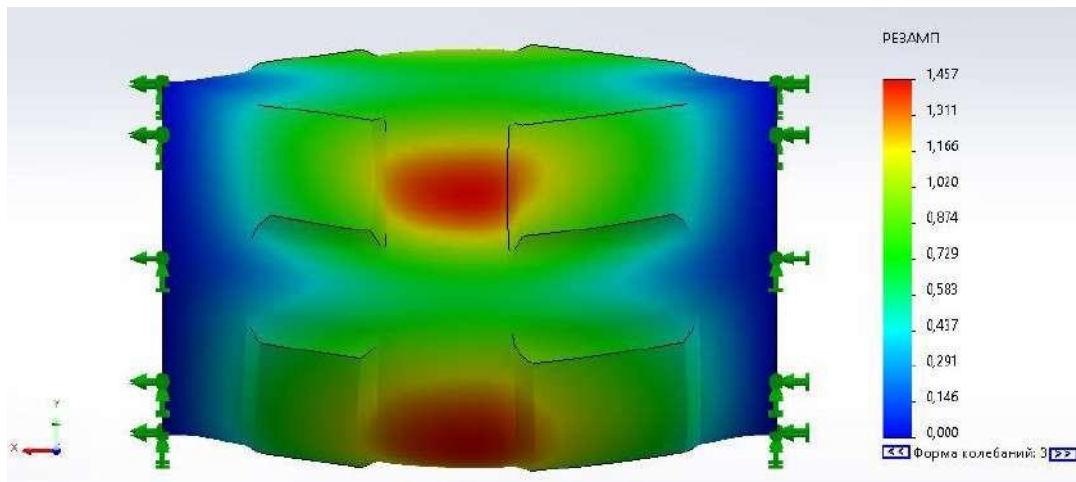


Рисунок 5.3 - Эпюра распределения напряжений режима 3

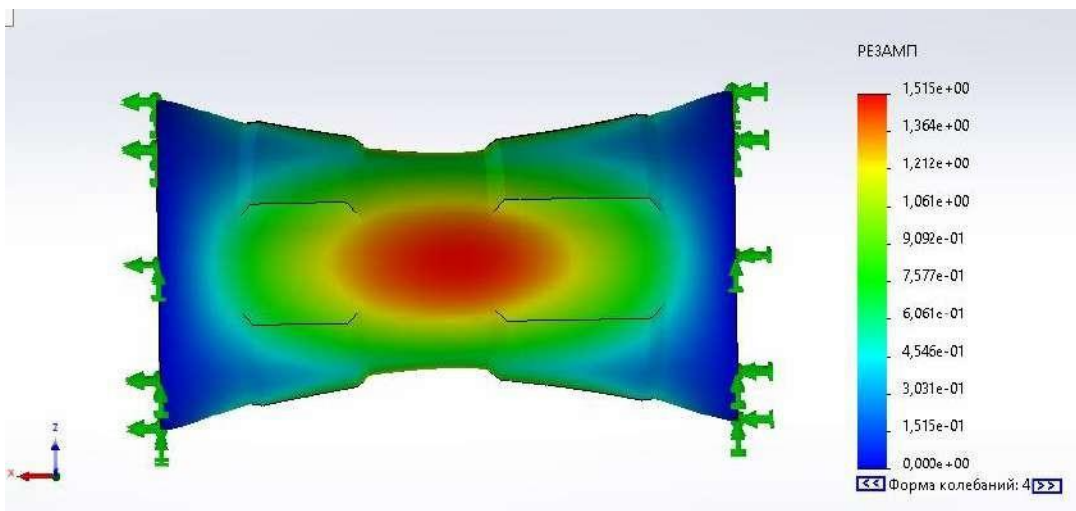


Рисунок 5.4 - Эпюра распределения напряжений режима 4

А для оси Y - 4 режим с частотой 1 963,6 Гц, где задействовано 52% массы втулки (рис. 4.4). Так же можно сделать вывод, что центральная часть втулки наиболее подвержена деформациям и вибрациям.

Решение системы линейных дифференциальных уравнений движения при помощи программы SolidWorks позволило определить, что наиболее опасным для втулки в направлении оси Z является режим с частотой 1963,4 Гц, а для оси Y - режим с частотой 1963,6 Гц, где задействовано 52% массы втулки.

5.2 Определение собственных частот втулки в зажимных оправках с помощью метода конечных элементов.

Основываясь на теоретических и экспериментальных данных, приведенных в главе 4, было проведено численное моделирование с помощью частотного анализа методом конечных элементов, действующей и разработанной оправке.

Частотный анализ необходим, чтобы вычислить, как конструкция будет деформироваться на собственных частотах, а также позволяет вычислить количество масс втулки, которая связана с этой частотой. Так же можно узнать суммарную эффективную массу для каждого направления.

При исследовании действующей на производстве оправки в ходе частотного анализа на зажимную крышку воздействовали силой равной 4000 Н.

Результаты анализа приводятся в табл. 5.2 и рис. 5.5, где отображается список коэффициентов массового участия в глобальных направлениях X , Y и Z , нормализованных относительно общей массы, после запуска частотного исследования.

Таблица 5.2 - Коэффициенты массового участия в глобальных направлениях для действующей на производстве оправки

Режим, No.	Частота, (Герц)	Направление X, %	Направление Y, %	Направление Z, %
1	632,46		51	0
2	635,97		0	51
3	2 404,9			
4	2 909,6			
5	3 001,9			
6	3 047,5			
7	3 064		0	
8	3 629,8		13	
9	3 633,4		0	13
10	4 301,2	68		
Суммарная эффективная масса, %		68	64	64

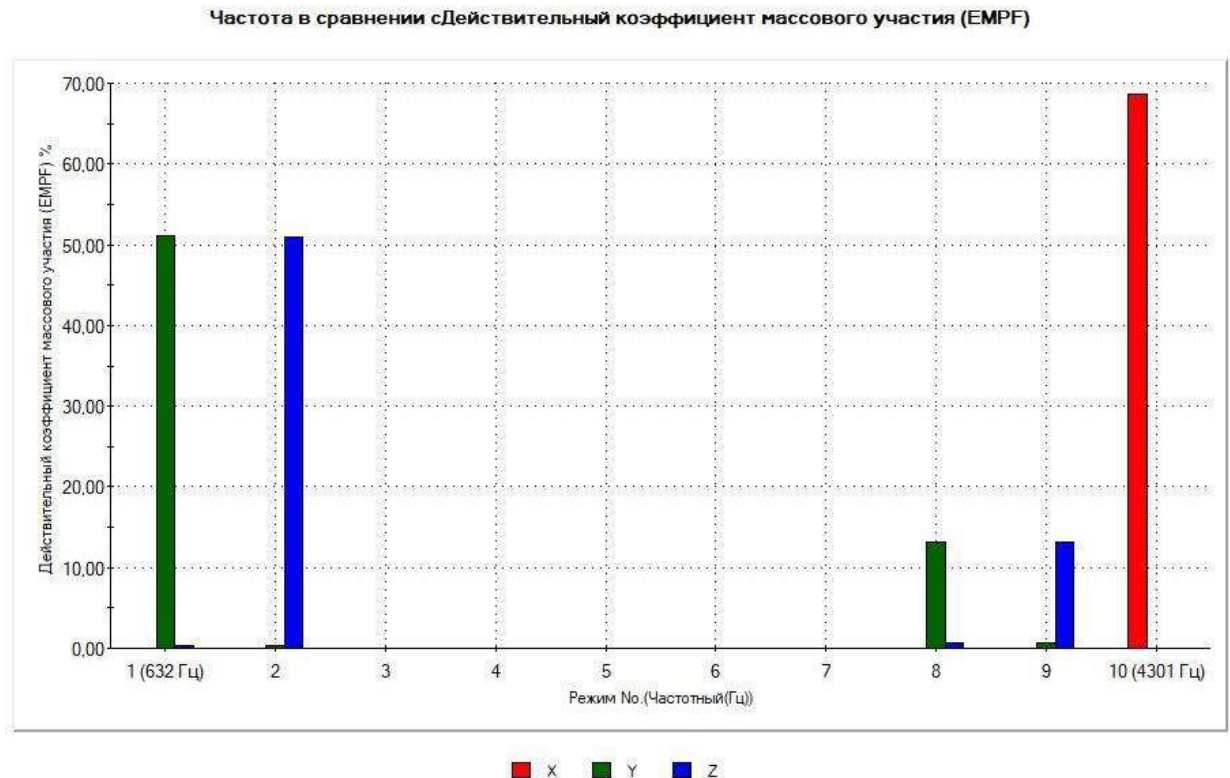


Рисунок 5.5 - График частот колебаний в сравнении с действительным коэффициентом массового участия для втулки, закрепленной в действующей оправке

Из выходных данных видно, что наиболее опасными частотами для втулки, закрепленной в действующей оправке, в направлении оси X является 10 режим с частотой 4301,2 Гц, где задействовано 68 % массы втулки. Для оси Y являются 1 и 8 режимы с частотой 632,46 Гц и 3629,8 Гц, где задействовано 51% и 13 %, для оси Z 2 и 9 режимы с частотой 635,7 Гц и 3633,4 Гц, где задействовано 51% и 13 %

Для сравнения собственных частот так же был применен частотный анализ на разработанной оправке. В ходе исследования на эластичную втулку воздействовали с силой равной 400 Н, а на зажимную крышку силой равной 4000 Н.

Результаты анализа приводятся в табл. 5.3 и рис. 5.6, где отображается список коэффициентов массового участия в глобальных направлениях X, Y и Z

Z, нормализованных относительно общей массы, после запуска частотного исследования

Таблица 5.3 - Коэффициенты массового участия в глобальных направлениях для разработанной оправки

Режим No.	Частота (Герц)	Направление X %	Направление Y %	Направление Z %
1	533,16			
2	567,53		14	11
3	569,31		10	13
4	594,78			
5	617,54		1	2
6	617,97		2	1
7	648,73		12	9
8	651,43		10	13
9	680,19	3		
10	684,07			
Суммарная эффективная масса %		3	49	49

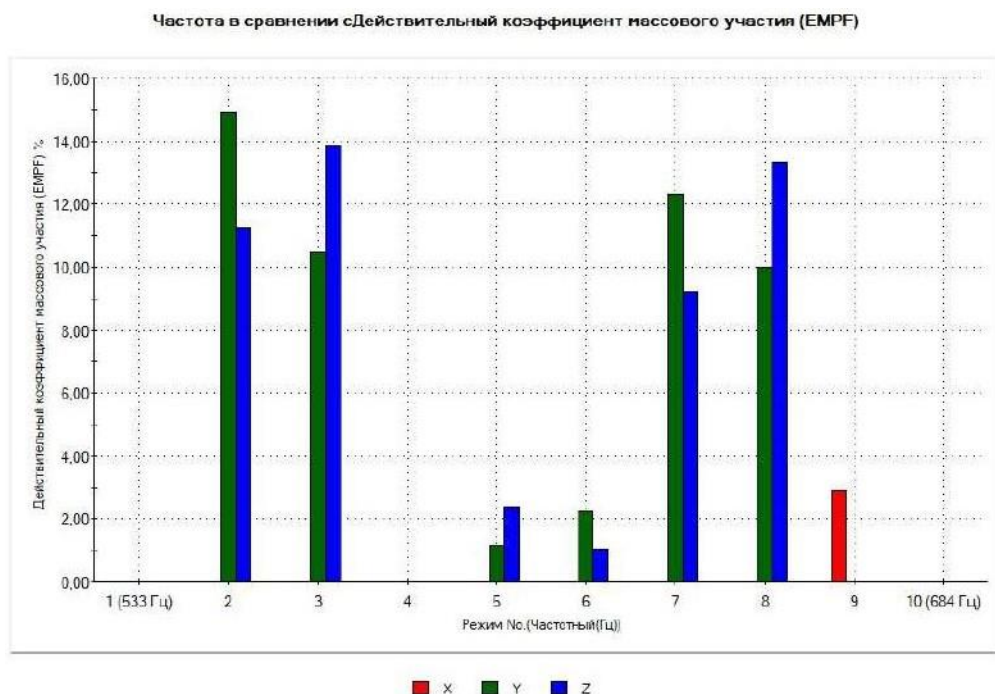


Рисунок 5.6 - График частот в сравнении с действительным коэффициентом массового участия для втулки, закрепленной в разработанной оправке

5.3 Проверка наличия резонанса

Как известно: «резонанс – это явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к собственной частоте колебательной системы».

В работе [121] показано, что наибольшая интенсивность автоколебаний проявляется, если соотношение времени резания T_1 с периодом собственных колебаний тонкостенного элемента T_2 , названное определяющим соотношением [defining relationship] DF , находится в пределах от 7 до 1: $7 > DF = T_1/T_2 \geq 1$. Эта часть осциллограммы (рис. 5.7) названа базовым фрагментом осциллограммы (БФО) [120].

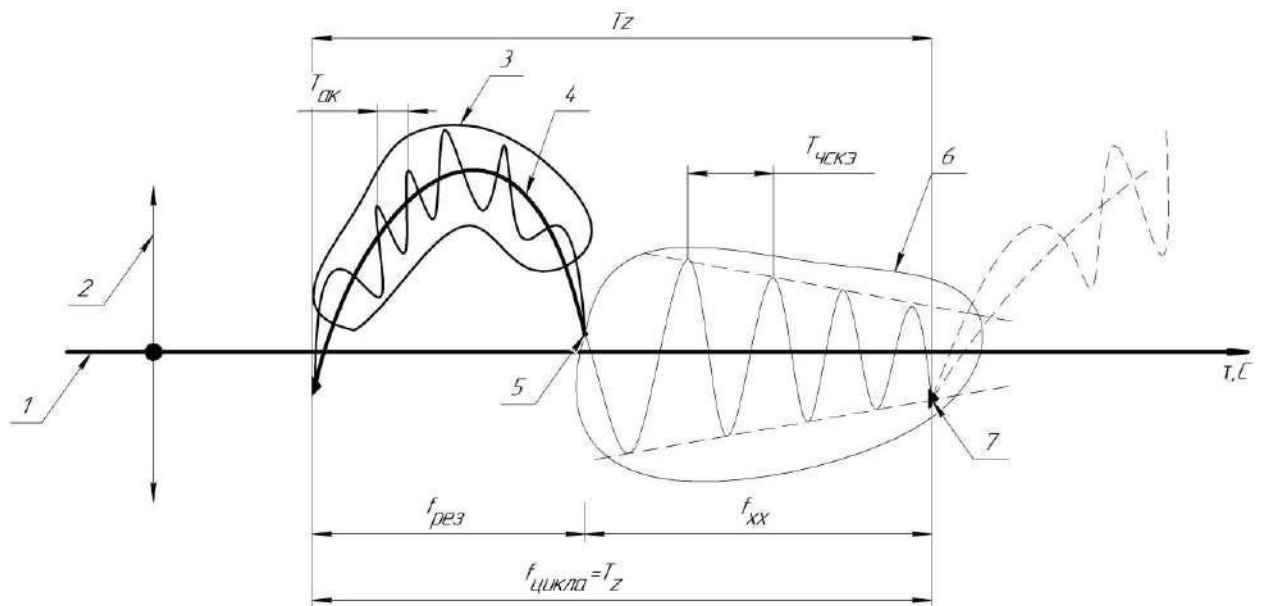


Рисунок 5.7 - Базовый фрагмент осциллограммы отклонения тонкостенного элемента при фрезеровании [118]: 1 - положение равновесия элемента, 2 - отклонение элемента, мкм; 3 - автоколебания. 4 - вынужденные колебания, 5 - Точка выхода n – зуба фрезы, 6 – Свободные затухающие колебания, 7 – Точка врезания $n+1$ зуба фрезы

На БФО можно точно определить временные характеристики этих видов колебаний.

а) T_z – период зубцовой частоты возбуждения колебаний, который состоит из t_1 – времени резания одним зубом фрезы и t_{xx} – времени холостого хода между резанием двух соседних зубьев.

б) T_2 – период собственных частот колебаний элемента, с.

в) $T_{ак}$ – период автоколебаний, с.

Ранее было установлено [27], что наиболее опасными для втулки в поперечных направлениях, в котором на втулку действует формообразующая режущая кромка фрезы, является режим с частотой 1 964 Гц. Тогда $T_2 = 1/1964 = 0.00051$ с.

Время резания одним зубом T_1 определяется по формуле:

$$T_1 = \frac{(\theta_V + \theta_Q) \cdot 60}{2\pi n} \text{ с}, \quad (5.3)$$

где $(\theta_V + \theta_Q)$ – угол, на котором режущая кромка одного зуба контактирует с заготовкой (рис. 5.8).

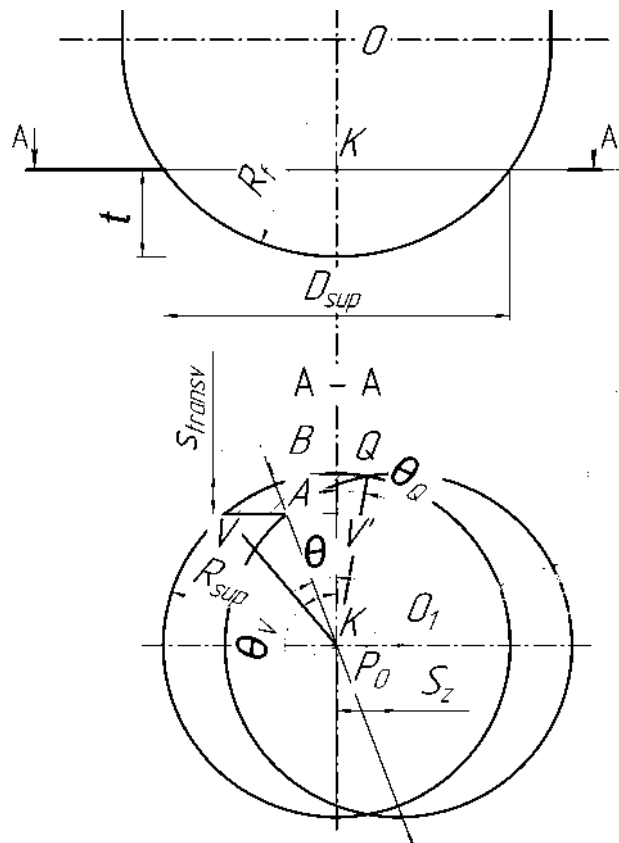


Рисунок 5.8 - Схема для расчета угла контакта зуба фрезы

На рис. 5.8 показаны:

- точка O – центр фрезы текущего реза,
- точка O_1 – центр предыдущего реза,
- R_f – радиус инструмента,
- t – глубина резания,
- s_z – подача на зуб,
- θ_V – угол начала реза,
- θ_Q – угол конца реза.

Из верхней части рис. 5.8 находим R_{sup} – максимальную длину радиуса, на котором происходит резание

$$R_{sup} = \sqrt{R_f^2 - (R_f - t)^2} = 8,29 \text{ мм.} \quad (5.4)$$

Из $\Delta VV'K$:

$$\cos(\theta_V) = \frac{V'K}{VK} = \frac{R_{sup} - s_{transv}}{R_{sup}} = 0,952, \quad (5.5)$$

из ΔQP_0K :

$$\sin(\theta_Q) = \frac{P_0K}{QK} = \frac{s_z / 2}{R_{sup}} = 0,03. \quad (5.6)$$

Тогда

$$\theta_Q = 0,03, \theta_V = 0,311. \quad (5.7)$$

Однотипность вычислений значений DF , которые должны находиться в пределах от 7 до 1: $7 > DF = T_1/T_2 \geq 1$, можно упростить, если найти критические значения частот колебаний, текущие значения которых выдает моделирование.

В нашем случае время воздействия фрезы на втулку определено: $T_1 = 0,001 \text{ с}$. Периоду $T_1 = 0,001 \text{ с}$ соответствует частота $\omega = 1/0,001 = 1000 \text{ Гц}$.

Отношению $DF=T_1 / T_{2i}=7$, соответствует период $T_{2i}=0,001/7 = 0,00014$ с, что соответствует частоте $\omega=1/0,00014=7000$ Гц.

5.3.1 Автоколебания втулки

Из выходных данных видно, что наиболее опасными для втулки в направлении оси Z является 3 режим с частотой 1 963,4 Гц, где задействовано 52% массы втулки (рис. 5.3).

А для оси Y - 4 режим с частотой 1 963,6 Гц, где задействовано 52% массы втулки (рис. 5.4). Так же можно сделать вывод, что центральная часть втулки наиболее подвержена деформациям и вибрациям.

В целом, следует считать, что при гипотетическом воздействии на втулку переменной нагрузкой при фрезеровании двузубой фрезой с заданным режимом резания, возможно появление значительных автоколебаний на частоте около 1 963,5 Гц.

5.3.2 Автоколебания втулки, закрепленной в штатной оправке

Из выходных данных видно (Рис 5.5, Таб 5.2), что наиболее опасными для оправки в направлении оси X является 10 режим с частотой 4301,2 Гц, где задействовано 68 % массы втулки. Для оси Y являются 1 и 8 режимы с частотой 632,46 Гц и 3629,8 Гц, где задействовано 51% и 13 % массы втулки, для оси Z - 2 и 9 режимы с частотой 635,7 Гц и 3633,4 Гц, где задействовано 51% и 13 % массы втулки.

5.3.3 Автоколебания втулки, закрепленной в разработанной оправке

Из анализа полученных данных (Рис 5.6., Таб. 5.3.), можно сделать вывод, что коэффициенты массового участия на разработанной оправке распределились по более низким собственным частотам (от 533 до 684 Гц), т.е. система абсолютно устойчива к появлению автоколебаний.

При этом уменьшился процент задействованной эффективной массы втулки в случае таких колебаний, т.е. система еще и обладает демпфирующей способностью.

Следовательно, данная технологическая система устойчива против автоколебаний, а те шероховатости, которые наблюдаются на обработанной поверхности, являются следами вынужденных колебаний.

5.3.4 Экспериментальные исследования влияния оправки с повышенной виброустойчивостью на технологическое обеспечение шероховатости поверхностей

С целью сравнительного анализа шероховатости поверхностей изготовленных втулок проводились измерения при применении действующей на производстве оправки и оправки с повышенной виброустойчивостью.

В качестве средства проведения использовался прибор для измерения шероховатости поверхностей профилометр «Hommel-etamic w5» [129].

Обработка впадин осуществляется сферической фрезой со сменными пластинами. Режимы резания: на врезании скорость резания $V_c = 282,6$ м/мин, частота вращения фрезы $n = 3000$ мин⁻¹, подача $S_{мин} = 450$ мм/мин, глубина резания $t = 2,5$ мм, ширина фрезерования $B = 3$ мм. При дальнейшем фрезеровании $V_c = 282,6$ м/мин, $n = 3000$ мин⁻¹, $S_{мин} = 3000$ мм/мин, $t = 2.5$ мм, $B = 0,4$ мм.

Обработку втулки проводили поочередно: сначала на оправке, используемой на производстве, затем разворачивали на 180° и фрезеровали на вновь разработанной оправке. Шероховатость обработанных поверхностей измеряли в трех разных точках не менее пяти раз (Рис. 5.9). Результаты измерений заносили в таблицу 5.4, где был рассчитан средний результат.

Результаты эксперимента: Сравнение результатов показывает, что во втором случае шероховатость поверхностей в 1,5÷2 раза ниже. Предложенная оправка, по всем параметрам обеспечивает наименьшее

значение шероховатости обрабатываемой поверхности и может быть внедрено в производство для фрезерования втулки.



Рисунок 5.9 - Фотография замера шероховатости поверхностей втулки на разработанном приспособлении

Таблица 5.4 – Шероховатость поверхностей впадин на втулке, фрезерованной на различных оправках

№ опыта	Шероховатость поверхности, Ra, мкм					
	Действующая оправка			Оправка с повышенной виброустойчивостью.		
1	11,9	6,8	6,8	5,8	4,2	4,2
	Средняя величина – 8,5			Средняя величина – 4,7		
2	12,4	7,2	7,1	6,9	5,1	5,2
	Средняя величина – 8,9			Средняя величина – 5,7		
3	7,5	5,4	5,4	4,6	3,2	3,1
	Средняя величина – 6,1			Средняя величина – 3,6		
4	10,1	7,6	7,5	7,1	5,2	5,2
	Средняя величина – 8,4			Средняя величина – 5,8		
5	6,9	6,3	6,3	4,2	3,7	3,6
	Средняя величина – 6,5			Средняя величина – 3,8		

Выводы к главе 5

1. Численное моделирование в среде SolidWorks позволило установить наиболее опасные для обрабатываемой втулки частоты колебаний:

1, а. Собственно втулки, как твердого тела - в диапазоне $1963,4 \div 1963,6$ Гц, где задействовано 52% массы втулки.

1, б. втулки, закрепленной в штатной оправке – в направлении оси: X режим с частотой 4301,2 Гц, Y являются режимы с частотой 632,46 Гц и 3629,8 Гц, Z - режимы с частотой 635,7 Гц и 3633,4 Гц.

Для рассматриваемого случая определяющее соотношение [defining relationship] DF времени резания с периодом собственных колебаний тонкостенного элемента, находится в интервале $1.96 \in [1;7]$, характерном для появления автоколебаний. Следовательно, данная технологическая система неустойчива против автоколебаний.

1, в. Для втулки, закрепленной в разработанной оправке, показано, что интервалы возможных собственных частот колебаний системы (от 533 до 684 Гц), находятся вне опасного диапазона, поэтому автоколебания втулки при фрезеровании на принятых режимах исключены.

2. При фрезеровании двузубой фрезой втулки, закрепленной в штатной оправке, на опасных частотах в колебания может быть вовлечено до 68 % от массы втулки, в то же время как для разработанной оправки максимальная эффективная масса не превосходит 14 %.

Этот факт показывает, что у разработанной оправки демпфирование колебаний значительно сильнее, чем у штатной оправки (почти в 5 раз).

3. Сравнительный анализ втулки, обработанной на действующем приспособлении и на приспособлении с повышенной виброустойчивостью, показал, что шероховатость на разработанном приспособлении в $1,5 \div 2$ раза ниже, чем на действующем.

6 ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ РАЗРАБОТАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

6.1. Определение деформации втулки при закреплении на виброгасящей оправке

Для определения деформации втулки под действием сил закрепления был поставлен эксперимент с использованием специальной оправки (рис. 6.1).

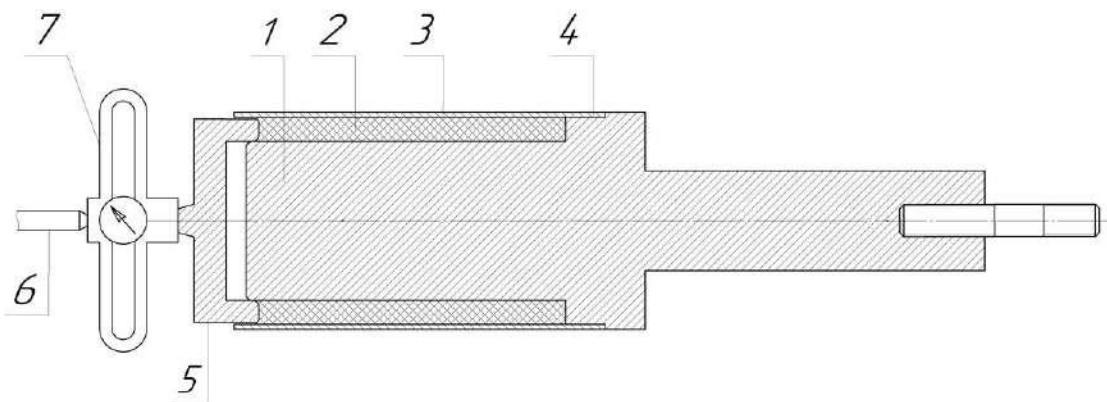


Рисунок 6.1 – Схемы проведения эксперимента

На оправку - 1 надевается упругоэластичная вставка - 2, втулка - 3 опирается в торец оправки и базируется на пояске - 4. Пуансон - 5, выполненный в виде крышки, базируется на стержне оправки и опирается в торец упругоэластичной вставки. Между задним центром - 6 и конусным носиком пуансона расположен динамометр Токаря Н.Г. - 7 (рис. 6.2). Величина осевого усилия контролировалась с помощью индикатора, прикреплённого к динамометру согласно таблице тарировки (Табл. 6.1).



Рисунок 6.2 – Фотография проведения эксперимента

Таблица 6.1 - Тарировочная таблица динамометра

Перемещение стрелки индикатора, мм	Сила, Н
0,86	2000
1,57	4000
2,1	6000
2,63	8000
3,15	10000
3,65	12000
4,13	14000
4,70	16000
5,25	18000
5,8	20000
6,33	22000
6,84	24000
7,38	26000
7,9	28000
8,47	30000

Изменения диаметра стальной втулки измерялось в двух плоскостях и в трех различных точках для каждой плоскости (рис. 6.3).

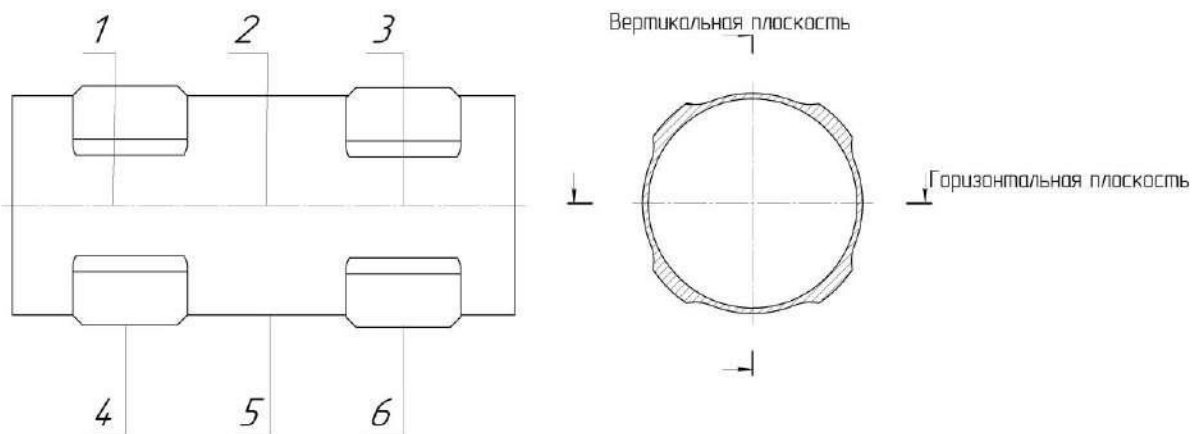


Рисунок 6.3 – Схема замеров деформации втулки

Эксперимент проводился до предела физических возможностей человека и до риска порчи используемого оборудования. Результаты эксперимента занесены в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 - Результаты эксперимента

№ опыта	Давление, МПа.	Сила в Н.	Замеры в горизонтальной плоскости в мм			Замеры в вертикальной плоскости в мм		
			Торец 1	Середина	Торец 2	Торец 1	Середина	Торец 2
	0	0	108,95	109,12	109,07	108,98	109,14	109,06
1	0,089	1000	108,95	109,12	109,07	108,98	109,14	109,06
2	0,173	2000	108,96	109,17	109,05	108,98	109,15	109,06
3	0,346	4000	108,96	109,17	109,05	108,95	109,13	109,05
4	0,519	6000	108,96	109,2	109,06	108,97	109,16	109,06

Из анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что при усилии в 6000 Н пластической деформации втулки не наступает, что соответствует теоретических исследований в главе 4 настоящей диссертации.

6.2 Исследование точности радиуса фрезерованной поверхности впадин втулки

Для определения перепада радиусов фрезерованной поверхности втулки разработано контрольное приспособление (рис. 6.4).

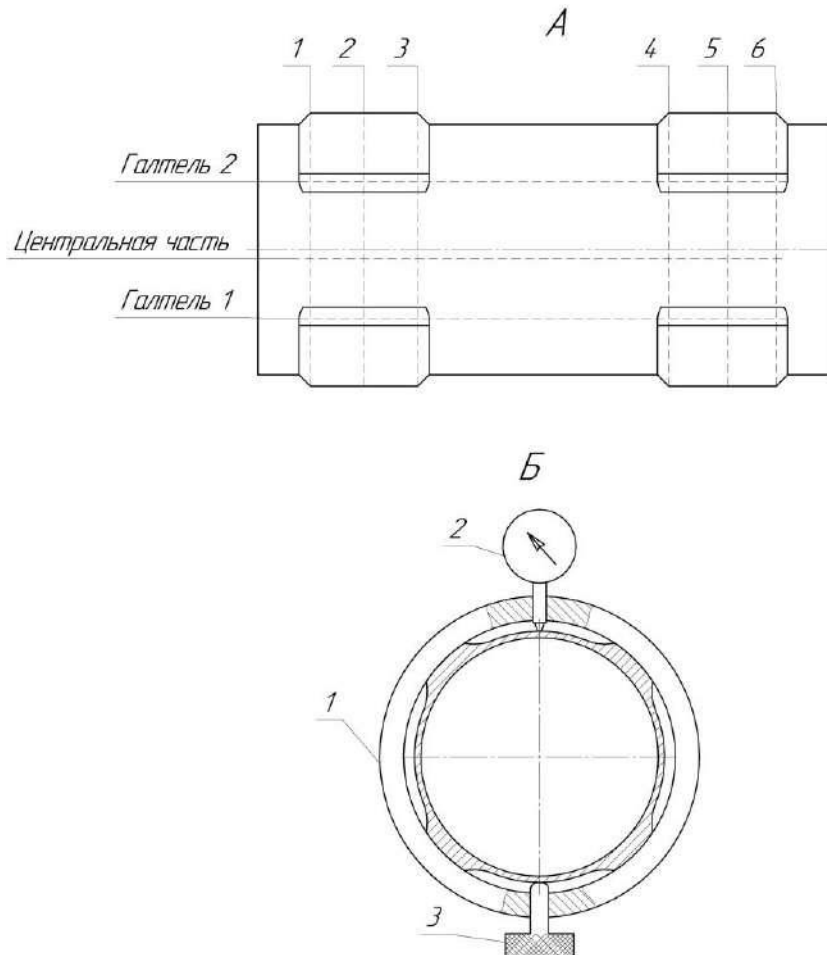


Рисунок 6.4 – Схемы замеров радиусов фрезерованной поверхности впадин втулки

На обработанную втулку (рис. 6.4 Б) надевается кольцо - 1, внутренним диаметром на 0,1 мм больше внешнего диаметра кольцевой ступени втулки. В диаметрально расположенных частях кольца помещены индикатор - 2 и фиксирующий винт - 3.

После механической обработки фрезерованием первой фасонной поверхности, на втулке размещалось измерительное кольцо (рис 6.5) и поджималось фиксирующим винтом, а на индикаторе выставлялся 0.



Рисунок 6.5 – Фотография замеров радиусов поверхности впадин втулки, фрезерованной на оправке без упругоэластичной вставки

Проводились замеры в точках 1,2,3 согласно рисунка 6.4А, после чего измерительное кольцо убиралось. После фрезерования второй фасонной поверхности в том же сечении процедура по установки измерительного кольца повторялась, а замеры проводились в точках 4,5,6. Результаты эксперимента заносились в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 Результаты эксперимента на действующей оправке

Левая фасонная поверхность				Максимальная разность значений
Значение в мм	Точка 1	Точка 2	Точка 3	
Галтель 1	0,030	0	0,042	0,042
Центральная часть	0,022	0,024	0	0,024
Галтель 2	0,046	0,038	0,022	0,024
Правая фасонная поверхность				
Значение в мкм	Точка 4	Точка 5	Точка 6	
Галтель 1	0,038	0	0,034	0,038
Центральная часть	0,030	0,026	0,032	0,004
Галтель 2	0,032	0,028	0,022	0,010

Аналогичный эксперимент был поставлен на оправке, которая содержит упругоэластичную втулку рис 6.6.



Рисунок 6.6 – Проведение замеров радиусов поверхности впадин втулки, фрезерованной на оправке с упругоэластичной вставкой

Результаты эксперимента заносились в таблицу 6.4

Таблица 6.4 Результаты эксперимента на разработанной оправке

Левая фасонная поверхность				Максимальная разность значений
Значение в мм	Точка 1	Точка 2	Точка 3	
Галтель 1	0	0,010	0	0,010
Центральная часть	-0,010	-0,008	-0,004	0,006
Галтель 2	-0,002	-0,006	-0,008	0,006
Правая фасонная поверхность				
Значение в мкм	Точка 4	Точка 5	Точка 6	
Галтель 1	0	0,014	0,028	0,028
Центральная часть	0,020	0,012	0,014	0,008
Галтель 2	0,016	0,016	0,018	0,002

С целью сравнительного анализа двух экспериментов была построена столбчатая диаграмма (рис. 6.7).

При анализе полученных данных можно сделать выводы:

1) На обеих оправках в левой стороне (точки - 1) разность радиусов больше, чем на правой (точки - 4).

2) При фрезеровании тонкостенной втулки на разработанной оправке разность значений на обработанных участках меньше в 2,5 раза, что говорит о повышении общей жесткости технологической системы при использовании оправки с упругоэластичной вставкой.

3) Сравнительные производственные испытания фрезерования втулки на технологической системе при использовании оправки без упругоэластичной вставкой и с упругоэластичной вставкой показали в последнем случае повышение стойкости сферической фрезы в 2 раза. На действующем приспособлении одной пары твердосплавных пластинок

хватало для обработки 7-8 втулок, в то время как на разработанном приспособлении для 15-16 втулок.

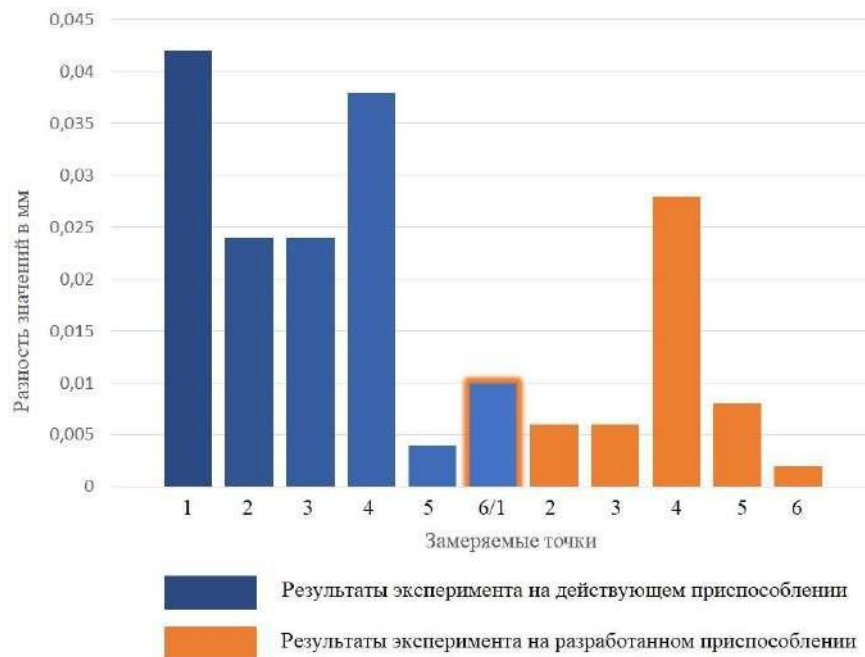


Рисунок 6.7 – Столбчатая диаграмма разности полученных значений

Повышение стойкости в 2 раза объясняется снижением уровня вибраций. В работе Л.А. Васина [30] показано: «В процессе обработки металлов резанием возникают вибрации, которые, при повышении допустимого уровня, приводят к снижению стойкости режущих инструментов в 3...4 раза». Л.А. Васин [30] объясняет это сложением текущей и вибрационной составляющей скорости относительного движения инструмента, что вызывает мгновенное превышение допустимой скорости резания, повышение температуры на режущей кромке выше критической для материала режущей части и, соответственно, снижение стойкости.

6.4 Обоснование технико-экономического эффекта от применения новой технологической оснастки – виброгасящей оправки

Основной эффект может быть получен при учете стоимости брака обработанных втулок по превышению шероховатости сверх допустимой. Поскольку припуск на доработку не установлен, то все эти втулки должны быть списаны в брак. Учитывая, что брак при обработке на старой оправке

достигал 8% и стоимость обработанной втулки 5014 руб. можно подсчитать стоимость брака при условной годовой программе выпуска 15000 дет.

$$\text{Эфф} = 15000 \times 0,8 \times 5014 \text{ р} = 6\,016\,800 \text{ руб.}$$

Повышение стойкости сменных пластинок фрезы стоимостью 1600 руб. в 2 раза (с 8-х обработанных втулок до 16) обеспечивает экономию на расходе пластинок при условной годовой программе выпуска 15000 дет.

$$\text{Эпл} = 3\,001\,600 \text{ руб.}$$

Выводы к главе 6

1. Из анализа полученных данных можно сделать вывод о том, что при усилии в 6000 Н пластической деформации втулки не наступает, что соответствует теоретических исследований в главе 4 настоящей диссертации.

2. Дальнейшие совершенствования технологии целесообразно проводить путем увеличения жесткости разработанной оправки с помощью поджима задним центром, при этом задний центр должен обладать быстросъемными креплениями, во избежание увеличения вспомогательного времени на установку втулки.

3. Основной эффект получен при учете стоимости брака обработанных втулок по превышению шероховатости сверх допустимой. Учитывая, что брак при обработке на старой оправке достигал 8% и стоимость обработанной втулки 5014 руб. стоимость брака при условной годовой программе выпуска 15000 дет. составляет 6 016 800 руб.

Повышение стойкости сменных пластинок фрезы стоимостью 1600 руб. в 2 раза обеспечивает экономию на расходе пластинок, при условной годовой программе выпуска 15000 дет. 3 001 600 руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе дано решение актуальной задачи: теоретически и экспериментально обоснованы способ и оправка для повышения технологической жесткости и виброустойчивости закрепляемой втулки при фрезеровании сферической фрезой, осуществляемого путем радиального поджима обрабатываемой втулки с помощью упругоэластичной вставки, помещенной между базирующей оправкой и закрепляемой втулкой, сжимаемой в осевом направлении.

1. В процессе обработки тонкостенной втулки, базированной по двум коротким цилиндрическим поясам и зажатой осевой силой, возникают вибрации, которые ухудшают качество обработанных поверхностей на неподкрепленном конце втулки, выводя значения шероховатости за пределы установленных значений в $1,5 \div 1,7$ раза. Объем неисправимого брака достигает 8 % при нормативном значении 2%.

2. Причиной, вызывающей колебания втулки, является переменный характер сил резания по времени, а также недостаточная жесткость неподкрепленного конца втулки и отсутствие каких-либо демпфирующих виброгасящих элементов. Анализ литературных источников показывает, что следует увеличивать жесткость и демпфирующую способность втулки с неподжатой центральной по длине части.

3. Процесс резания сферической фрезой отличается наличием вблизи оси фрезы толщин срезаемых слоев материала и скорости резания, стремящихся к нулю, для которых нет доказанных зависимостей силы резания от геометрических параметров срезаемого слоя.

4. При сжатии резины пуансоном, установленным в тонкостенной стальной втулке, подтвержден трехосный характер нагружения резиновой вставки в замкнутом объеме, а также идентичность резины по несжимаемости техническим жидкостям. С учетом высокого коэффициента гистерезисных потерь резины ($\eta=0.05 \div 2$) и твердого состояния в

ненагруженном состоянии это способствует её применению в виброгасящих приспособлениях.

5. Численное моделирование в среде SolidWorks позволило установить наиболее опасные для обрабатываемой втулки частоты колебаний как собственно втулки, как твердого тела (1963,4÷1963,6 Гц), так и закрепленной в штатном приспособлении – (4301,2 Гц, 632,46 Гц и 3629,8 Гц, 635,7 Гц и 3633,4 Гц). Определяющее соотношение времени резания с периодом собственных колебаний тонкостенного элемента, находится в интервале $1.96 \in [1;7]$, характерном для появления автоколебаний, следовательно, базовая технологическая система неустойчива против автоколебаний.

6. Для втулки, закрепленной в разработанном приспособлении, показано, что интервалы возможных собственных частот колебаний системы (от 533 до 684 Гц), находятся вне опасного диапазона, поэтому автоколебания втулки при фрезеровании на принятых режимах исключены.

7. Результаты моделирования показывают, что предложенное приспособление повышенной виброустойчивости, по всем параметрам обеспечивает точность формы в пределах допуска, а также наименьшее значение шероховатости обрабатываемых поверхностей и может быть внедрено в производство для фрезерования втулок.

8. Выведенная аналитическая зависимость подтверждена результатами эксперимента и может быть рекомендована для расчета напряжения сжатия полиуретановых втулок.

9. Сравнительные испытания фрезерования тонкостенной втулки на штатной и разработанной оправке показали, что на новой оправке разность значений радиуса обработанной цилиндрической поверхности на обработанных участках в 2,5 раза меньше, чем на штатной, что говорит о повышении общей жесткости технологической системы при использовании приспособления с упругоэластичной вставкой на всей длине. При этом в

последнем случае наблюдается повышение стойкости сферической фрезы в 2 раза.

10. Основной эффект быть получен за счет снижения неисправимого брака и при условной годовой программе выпуска дет. 15000 составляет 6 016 800 руб. Повышение стойкости сменных пластинок фрезы в 2 раза обеспечивает экономию на расходе пластинок 3 001 600 руб.

Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы

Провести оптимизацию конструкции по толщине упругоэластичной вставки. Исследовать возможность снижения неравномерности радиальных деформаций закрепляемой заготовки путем разделения упругоэластичной вставки на части по длине с использованием жестких вставок.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Структурный элемент "Обозначения и сокращения" содержит перечень обозначений и сокращений, применяемых в данной работе.

σ_b [МПа] - предел прочности;

n [мин⁻¹] - частота вращения;

V [м/мин] - скорость резания;

S [мм/об] – подача;

f_n Подача на оборот, мм/об;

ε [%] - Степень деформации;

β [%] - уровень доверительной вероятности;

P_{pd} – мощность, затрачиваемая на деформирование срезаемого слоя;

P_{fR} – мощность, затрачиваемая на контактные процессы на передней поверхности в системе «стружка-инструмент»;

P_{fF} – мощность, затрачиваемая на контактные процессы на задней поверхности в системе «обработанная поверхность-инструмент»;

P_{ns} – мощность, затрачиваемая на образование новых поверхностей,

a_e Ширина фрезерования мм;

a_p Осевая глубина резания мм;

D_{cap} Диаметр резания при глубине резания a_p мм;

D_m Обрабатываемый диаметр (диаметр детали), мм;

f_z Подача на зуб мм/зуб;

v_e Эффективная скорость резания мм/мин;

v_f Минутная подача мм/мин;

z_c Эффективное число зубьев шт.;

h_{ex} Максимальная толщина стружки мм;

h_m Средняя толщина стружки мм;

k_c Удельная сила резания Н/мм²;

P_c Потребляемая мощность кВт;

M_c Крутящий момент Н•м;

- Q Скорость съёма металла см³/мин;
- K_{APR} Главный угол в плане град;
- P_{SIR} Угол в плане (дюйм.) ;
- B_D Диаметр корпуса мм;
- D_C Диаметр резания мм;
- L_U Рабочая длина мм;

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

В настоящей работе применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Деталь - изделие, изготовленное без применения сборочных операций

Овальность - отклонение от круглости, при котором реальный профиль представляет собой овалообразную фигуру, наибольший и наименьший диаметры которой находятся во взаимно перпендикулярных направлениях.

Технологическое наследование - явление переноса свойств объектов от предшествующих технологических операций к последующим.

Обработка резанием - Обработка, заключающаяся в образовании новых поверхностей отделением поверхностных слоев материала с образованием стружки.

Примечание. Образование поверхностей сопровождается деформированием и разрушением поверхностных слоев материала.

Технологический режим - Совокупность значений параметров технологического процесса в определенном интервале времени.

Примечание. К параметрам технологического процесса относятся: скорость резания, подача, глубина резания, температура нагрева или охлаждения и т.д.

Скорость резания - расстояние, пройденное точкой режущей кромки инструмента относительно заготовки в направлении главного движения в единицу времени. Скорость резания имеет размерность м/мин или м/сек.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 24737-81.** Резьба трапецеидальная однозаходная. Основные размеры. Национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: дата введения 01.01.1982. – М., 1982.- 6 с. - Текст: непосредственный.
2. **ГОСТ 8732-78.** Трубы стальные бесшовные горячедеформированные. Сортамент (с Изменениями N 1, 2) национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: дата введения 01.01.1979. - Москва: Стандартинформ, 2007. - 29 с. - Текст: непосредственный.
3. **ГОСТ ISO 7743-2013.** Резина и термоэластопласты Определение упругопрочностных свойств при сжатии: национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное – М.: Стандартинформ, 2016. - 19 с. - Текст: непосредственный.
4. **Патент № 273992 ГДР. МКИ В23С5/10.** Демпфирующее устройство для фрез.
5. **Патент № RU 2134182, D 23 D 31/40.** Оправка для центрирования и закрепления тонкостенной детали / Смирнов В.Г., Егоров Б.А., Смирнов Г.В., Федоров А.А., Сафьянов А.В. ОАО Верхнесалдинское металлургическое производственное объединение, АОО Челябинский трубопрокатный завод. Оpubл.: 10.08.1999.
6. **Патент № RU 2134629 В23Q 3/00.** Способ закрепления тонкостенной детали / Дубинова И.Д.; Дубинов А.Е.; Нижегородцев Ю.Б. / Российский Федеральный Ядерный Центр - ВНИИ экспериментальной физики; Министерство Российской Федерации по атомной энергии. Оpubл. 20.08.1999.
7. **Патент № RU 2291760 С2 В23 В31/40.** Оправка для обработки тонкостенной детали / Тимофеев А. П. / Открытое акционерное общество "Станкотехника" (RU). Оpubл.: 20.01.2007.

8. **Патент № 2295416 РФ** на изобретение МПК8 C21D8/10, C21D8/10. Способ изготовления осесимметричных корпусов (RU 2295416) / Н. А. Макаровец, В. И. Трегубов, В. А. Корольков [и др.]. Владельцы патента: Федеральное Государственное унитарное предприятие "Государственное научно-производственное предприятие "Сплав" (RU). Оpubл.: 20.03.2007.
9. **Патент № 2688019 Российская Федерация, МПК В23В31/40 (2006.01), В23В 31/40 (2019.02)**, Оправка для закрепления тонкостенных цилиндрических заготовок: №2018142975: заявл: 05.12.2018: опубл. 17 мая 2019. / Богомолов М.Н., Чуприков А.О., Ямников А.С.; заявитель ТулГУ. -7 с.: ил. – Текст: непосредственный.
10. **Патент CN 104043977**, Китай, В23Q 3/00, Быстрый зажим для фрезерования тонкостенных трубных заготовок. 陈 利. Приоритет CN201310080769.4A. 17.09.2014.
11. **Патент SU 831402 Советский патент, МПК В23В 31/20(2006.01)**, Разжимная оправка: №2745386 заявл: 03 апреля 1979: опубл. 23 мая 1981 / Александров А.А., Федоров Б.В., Ельцов Ю.А. заявитель Ижевский механический институт. -4 с.: ил. – Текст: непосредственный.
12. **Патент SU N 663495, Советский патент, МПК В 23 В 31/40, 1979 -** Способ закрепления тонкостенных деталей / Кобылин Р.А., Сенькин Е.С., Бойченко А.Е., Ганопольский Ф.Б., Ганов В.К. / Предприятие П/Я Г-4575, опубл. 25.05.79, бюл. №19.
13. **Амосов, И.С.** Осциллографические исследования вибраций при резании металлов / И.С. Амосов // Точность механической обработки и пути ее повышения. М.: Машгиз.- 1951.- С. 414-477.
14. **Амосов, И.С.** Точность вибрации и чистота поверхности при токарной обработке / И.С. Амосов, В.А. Скраган М.-Л., МАШГИЗ. 1958. 91 с.

15. **Андреева, Л. Е.** Упругие элементы приборов / Л.Е. Андреева, под редакцией А.Г. Акимова – М.: Машиностроение, 1962.- 456 с. - Текст: непосредственный.
16. **Балакшин, Б. С.** Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин, под редакцией И.И. Лесниченко – М.: Машиностроение, 1969. - 556 с. - Текст: непосредственный.
17. **Биндер, М. Г.** Исследование возможностей управления процессом резания / М. Г. Биндер, В. Э. Хитрик, В. Э. Шмаков // Конструкции и надежность машин: Тр. ЛПИ, 1988.- Вып. №428. - С. 48 -53.
18. **Бобров, В. Ф.** Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров под редакцией С.Л. Мартенс – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с. - Текст: непосредственный.
19. **Богомолов, М. Н.** Автоматизация подготовки производства / М.Н. Богомолов // Вестник ТулГУ. Автоматизация: проблемы, идеи, решения: Сб. трудов заочной Междунар. научно-техн. конф. «АПИР-22», 9-10 ноября 2017 г./ под ред. В.В. Прейса. - Тула: Изд-во ТулГУ, 2017. - С. 187-190.
20. **Богомолов, М. Н.** Анализ деформаций деталей, обусловленных технологией изготовления / М.Н. Богомолов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 12. – С. 411-414. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-12-412-416.
21. **Богомолов, М. Н.** Моделирование динамики фрезерования сложнопрофильных деталей / М. Н. Богомолов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 5. – С. 371-376.
22. **Богомолов, М. Н.** Обеспечение заданного качества поверхности с помощью приспособления повышенной виброустойчивости / М.Н. Богомолов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 637-640.

23. **Богомолов, М. Н.** Определение собственных частот колебания фасонной втулки / М.Н. Богомолов, А.С. Ямников // Проблемы функционирования систем транспорта: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Тюмень, 02–04 декабря 2020 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2020. – С. 500-503.
24. **Богомолов, М.Н.** Повышение устойчивости процесса фрезерования тонкостенных труб / М.Н. Богомолов // Научный семинар технологов – машиностроителей «Перспективные направления развития финишных и виброволно-вых технологий. Ростов–на–Дону, 26 февраля 2021 г. - С. 82-86.
25. **Богомолов, М. Н.** Причины возникновения автоколебаний при резании / М.Н. Богомолов // Научный альманах. – 2017. – № 1-3(27). – С. 25-30. – DOI 10.17117/na.2017.01.03.025.
26. **Богомолов, М. Н.** Снижение влияния динамических нагрузок на качество поверхности фрезерованных тонкостенных втулок / М.Н. Богомолов, А.С. Ямников // Справочник. Инженерный журнал. – 2021. – № 5(290). – С. 38-42. – DOI 10.14489/hb.2021.05.pp.038-042.
27. **Богомолов, М. Н.** Экспериментальное определение распределения деформации втулки по длине фрезерной оправки / М.Н. Богомолов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2021. – № 10. – С. 608-611. – DOI 10.24412/2071-6168-2021-10-608-611.
28. **Бородкин, Н. Н.** Особенности формирования структуры силового поля в окрестности вершины резца с высокодемпфирующей конструкцией державки / Н.Н. Бородкин, Л.А. Васин, С.А. Васин // СТИН. – 2018. – № 4. – С. 19-26.
29. **Быков, Г. Т.** Определение погрешности базирования тонкостенных цилиндров при установке на цанговую оправку / Г.Т. Быков, А.А.

- Маликов, А.С. Ямников // Технология машиностроения. – 2010. – № 1. – С. 21-24.
30. **Васин, Л. А.** Эмерджентный подход к созданию виброустойчивых режущих инструментов / Л.А. Васин, С.А. Васин, А.А. Кошелева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 11-2. – С. 377-385.
31. **Высокопроизводительная обработка металлов резанием:** Учебное пособие. SANDVIK COROMANT. – М.: «Полиграфия», 2003. – 301 с. ISBN 5-89479-027-1. - Текст: непосредственный.
32. **Гуськов, А. М.** Разработка методов построения и анализа динамических моделей технологических процессов при механической обработке: специальность 01.02.06 «Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры»: диссертация на соискание учёной степени доктора технических наук / Александр Михайлович Гуськов; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – М., 1997. - 335 с.
33. **Дальский, А. М.** Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин: монография / А.М. Дальский. – М. - Машиностроение, 1975. - 225 с.
34. **Дроздов, Н. А.** К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке /Н. А. Дроздов // Станки и инструмент. М. 1937,- №22.
35. **Жарков, И. Г.** Вибрации при обработке лезвийным инструментом. /И. Г. Жарков // Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. - 184 с.
36. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – Москва: МИР, 1975. 541 с.
37. **Износостойкие материалы в химическом машиностроении.** Справочник / Б.Д. Воронков, Ю.М. Виноградов, Г.Е. Лазарев и др.; Под ред. д-ра техн. наук Ю.М. Виноградова. - Ленинград: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1977. - 254 с.
38. **Киселев, И. А.** Моделирование динамики процесса фрезерования

- тонкостенных сложнопрофильных деталей: специальность 01.02.06 "Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Киселев Игорь Алексеевич. – Москва, 2013. – 243 с.
39. **Козлов, В. Н.** Расчёт режимов, сил и мощности резания / В.Н. Козлов. Методические указания к выполнению практических работ по дисциплине по дисциплине «Резание материалов и режущий инструмент». Томск: Изд. ТПУ, 2014. - 29 с. - Текст: непосредственный.
40. **Кондаков, Л. А.** Уплотнение гидравлических систем / Л.А. Кондаков. – М.: Машиностроение, 1972. – 240 с. - Текст: непосредственный.
41. **Корсаков, В. С.** Основы конструирования приспособлений: Учебник для вузов / В.С.Корсаков; - 2-е изд. - под ред. С. И. Булатов. – М.: Машиностроение, 1983. - 277 с. - Текст: непосредственный.
42. **Крагельский, И. В.** Коэффициенты трения: справочное пособие / И.В. Крагельский, И.Э. Виноградова – изд. второе, перераб. и доп. – М.: Машгиз, 1962. – 218 с. - Текст: непосредственный.
43. **Краснов, В. И.** Прокладки для разъемных соединений нефтехимического оборудования: справочник / В.И. Краснов // – М.: Химия, 1992. – 64 с. - ISBN 5-7245-0850-8. - Текст: непосредственный.
44. **Кувшинский, В. В.** Фрезерование./ В.В. Кувшинский // - М.: Машиностроение, 1977. - 240 с.
45. **Кудинов, В. А.** Динамика станков / В.А. Кудинов // М.: Машиностроение, 1967. – 360 с.
46. **Кудинов, В. А.** Динамическая характеристика резания / В.А. Кудинов // Станки и инструмент. 1963.- № 10. - С. 1 - 7.
47. **Кудинов, В. А.** Динамические расчеты металлорежущих станков. Расчеты на прочность / В.А. Кудинов, В.В. Каминская, В.И. Левин

- В.И. // Сб. статей. под ред. Н.Д. Таробасова. М.: Машиностроение, 1978.- Вып.25. - С. 183-198.
48. **Кузнецов, В. П.** Устойчивость технологической системы при нарезании резьбы многорезцовыми головками / В.П. Кузнецов, О.А. Ямникова - Текст: непосредственный // СТИН - 2004. - № 2. - С. 12 – 14.
49. **Кузнецов, В. П.** Точность и виброустойчивость при нарезании наружных резьб многорезцовыми головками Дисс канд. техн. наук.- / Кузнецов, Вячеслав Петрович; Тула: ТПИ, 1983. – 88 с.
50. **Лазарев, Г. С.** Автоколебания при резании металлов / Г.С. Лазарев // М.: высшая школа, 1971. 243с.
51. **Лазарев, Г. С.** Устойчивость процессов резания металлов / Г.С. Лазарев // М.: Высшая школа, 1973.- 184с.
52. **Леонтьев, Б. В.** Управление процессом резания с целью устранения вибраций / Б.В. Леонтьев, А.Н. Леонтьева - Текст: непосредственный // Вологодские чтения. Дальневосточный федеральный университет (Владивосток).- 2012.- №80.- С 159-162.
53. **Лепетов, В. А.** Резиновые технические изделия: учебное пособие / В.А. Лепетов. – Л.: Химия. - 1976. 440 с. - Текст: непосредственный.
54. **Макаров, А. Д.** Оптимизация процессов резания. / А.Д. Макаров; под редакцией И.И. Лесниченко. - М.: Машиностроение, 1976. - 278 с. - Текст: непосредственный.
55. **Малютин, Г. Е.** Определение усилий резания при чистовой объемной обработке вогнутых поверхностей сложной формы сферическими фрезами на станках с ЧПУ / Г.Е. Малютин // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2014. – № 4(306). – С. 74-81.

56. **Маталин, А. А.** Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / А.А. Маталин // М.: Машиностроение, 1970. - 320 с.
57. **Машиностроение. Энциклопедия** / Ред. Совет. К.В. Фролов (пред.) и др. *М.: Машиностроение* М 38 Динамика и прочность машин. Теория механизмов и машин. Т. 1-3. В 2-х кн. Кн. 1 / К.С. Колесников, Д.А. Александров, В.К. Асташев и др.; Под общ. ред. К.С. Колесникова. 1994. - 534 с. - Текст: непосредственный.
58. **Мурашкин, Л. С.** Прикладная нелинейная механика станков / Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. //- Л.: Машиностроение (Ленингр. отделение), 1977. - 192 с.
59. **Пегашкин, В. Ф.** Выглаживание поверхности отверстий с использованием УЗ крутильных колебаний / В. Ф. Пегашкин, Г. А. Осипенкова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2019. – № 4. – С. 69-72.
60. **Пегашкин, В. Ф.** Определение деформаций технологической системы при обработке деталей переменного по длине профиля / В.Ф. Пегашкин, А.П. Старостин - Текст: непосредственный // Наука – Образование – Производство: опыт и перспективы развития. Материалы XIV МНТК / Ответственные редакторы: М.В. Миронова, А.И. Пыстогов. – Екатеринбург. - НТИ (филиал) УрФУ в 2 т. 2018. - С. 194-200.
61. **Продан, В. Д.** Герметичность разъемных соединений оборудования, эксплуатируемого под давлением рабочей среды: учебное пособие / В.Д. Продан. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 280 с. – ISBN 978-5-8265-1150-3. - Текст: непосредственный.
62. **Продан, В. Д.** Радиальная деформация кольцевой прокладки при осевом ее сжатии / В.Д. Продан, А.В. Васильев, Г.В. Божко // Химическое и нефтегазовое машиностроение, 2011. - № 11. - С. 31-34.

63. **Прочность, устойчивость, колебания:** в 3 т. Т.2 Справочник / Б.Л. Абрамян, Н.Х. Арутюнян, И. А. Биргера [и др.]; отв. ред. И.А. Биргер, Я.Г. Пановко. – Москва. - Машиностроение. – 1968. - 464 с. - Текст: непосредственный.
64. **Прудников, М. И.** Особенности трения и смазки в парах резина-металл насосов и арматуры / М.И. Прудников // Вестник арматуростроителя. - № 7 (35). - 2016. - С. 88-91.
65. **Соколовский, А. П.** Расчет точности обработки на металлорежущих станках: учебное пособие / А.П. Соколовский// - М.: Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы, 1952. - 289 с. - Текст: непосредственный.
66. **Солянкин, Д. Ю.** Фрезоточение разнонаправленных резьб на примере обработки радиаторных ниппелей: диссертация кандидата технических наук: 05.02.07 / Солянкин Д. Ю.; [Место защиты: Тул. гос. ун-т].- Тула, 2011.- 210 с.
67. **Суслов, А. Г.** Технология машиностроения. / А.Г. Суслов // Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов.–2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2007. 430 с.
68. **Глустый, И.** Автоколебания в металлорежущих станках; / И. Глустый // Пер. с чешского / М.: Машгиз, 1956. 394 с.
69. **Трегубов, В. И.** Технологическое обеспечение заданных конструктивных параметров деталей двигателя РСЗО "Торнадо-г" / В. И. Трегубов, А. С. Ямников, И. А. Матвеев // Известия Российской академии ракетных и артиллерийских наук. – 2017. – № 4(99). – С. 94-98.
70. **Хуан, Ч.** Расчёт прочности режущих пластин при обработке титанового сплава / Ч. Хуан, Ц. Чжан, Е.Г. Лещинер, В.Н. Козлов - Текст: непосредственный // Актуальные проблемы в машиностроении,

- научно-технический и производственный журнал. Новосибирск. - 2016. - № 3. - С. 318-323.
71. **Яковлев, С. Н.** Расчет полиуретановых деталей, работающих на сжатие при статической нагрузке / С.Н. Яковлев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 1(190). – С. 137-142.
72. **Ямников, А. С.** Влияние геометрии осевого инструмента на минимальную толщину срезаемого слоя / А.С. Ямников, В.А. Масленников, В.Н. Татаринцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 8-2. – С. 95-106.
73. **Ямников, А. С.** Влияние технологии изготовления секций полых осесимметричных корпусов на биение базовых торцов / И.А. Матвеев, А.С. Ямников, О.А. Ямникова // Технология машиностроения. – 2017. – № 12. – С. 37-41.
74. **Ямников, А. С.** О характере колебаний при обработке тонкостенной втулки сферической фрезой / А. С. Ямников, М.Н. Богомолов // Инновации в машиностроении (ИнМаш - 2021) : Сборник трудов XII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Рахимянова Хариса Магсумановича, Новосибирск, 07–09 октября 2021 года / Под редакцией С.И. Василевской, Ю.С. Кудрявцевой. – Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2021. – С. 71-75.
75. **Ямников, А. С.** Определение минимальной удельной нормальной силы, необходимой для начала резания / А.С. Ямников, Ю.В. Мягков - Текст: непосредственный // Известия вузов. Машиностроение. МВТУ им. Н.Э. Баумана. - 2016. - №112. - С. 111-115.
76. **Ямников, А. С.** Определение условий виброустойчивого точения нежестких заготовок многорезцовыми головками / А.С. Ямников, О.А.

- Ямникова // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2012. – № 11(17). – С. 15-21.
77. **Ямников, А. С.** Повышение качества фрезерования фасонных поверхностей на тонкостенных втулках / А.С. Ямников, М.Н. Богомолов // Всероссийская научно-техническая конференция "Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении»: Сборник докладов, Тула, 23–25 октября 2019 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2019. – С. 128-131.
78. **Ямников, А. С.** Проявление технологического наследования при токарной обработке нежестких трубных заготовок / А.С. Ямников, И.А. Матвеев, Е.Н. Родионова // Черные металлы». - 2019. - №5.- С. 36-40.
79. **Ямников, А.С.** Технологические ограничения производительности обработки резанием / А.С. Ямников, // Технология машиностроения. Тула ТулГТУ. - 1994. - С. 5-8.
80. **Ямников, А.С.** Технологическое наследование свойств исходной заготовки в параметрах точности протяженных осесимметричных деталей / А.С. Ямников, О.И. Борискин, О.А. Ямникова, И.А. Матвеев // Черные металлы. – 2017. – № 12. – С. 50-56.
81. **Ямников, А. С.** Уменьшение влияния технологической наследственности при токарной обработке тонкостенных сварных корпусов / А.С. Ямников, А.О. Чуприков, В.В. Иванов // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2014. – № 1(28). – С. 142-147.
82. **Ямников, А.С.** Физическое моделирование деформации стальной втулки при осевом сжатии упругопластичного виброгасящего элемента фрезерной оправки / А.С. Ямников, М.Н. Богомолов. А.О. Чуприков // Черные металлы».- 2022. - №2.- С. 36-40.
83. **Ямников, А. С.** Фрезерная базирующе - зажимная оправка / А.С. Ямников, М.Н. Богомолов, А.О. Чуприков // Технология

- машиностроения. – 2019. – № 12. – С. 13-17.
84. **Ямников, А. С.** Центрирующая оправка повышенной виброустойчивости для фрезерования тонкостенных втулок / А.С. Ямников, М.Н. Богомолов // Черные металлы». - 2019. - №5. - С. 52-57.
85. **Ямникова, О. А.** Построение математической модели колебаний нежесткого вала при обработке резанием / О.А. Ямникова О.А.// СТИН. - 2003.- № 1. - С. 18 – 21.
86. **Abushawashi, Y.** A novel approach for determining material constitutive parameters for a wide range of triaxiality under plane strain loading conditions / Y. Abushawashi, X. Xiao, V.P. Astakhov - Текст: непосредственный // International Journal of Mechanical Science. – 2013. - Vol. 74. - P. 133–142.
87. **Abushawashi, Y.** FEM simulation of metal cutting using a new approach to model chip formation / Y. Abushawashi, X. Xiao, V.P. Astakhov - Текст: непосредственный // International Journal of Advances in Machining and Forming Operations. - 2011. – V. 3. - P. 71-92.
88. **Astakhov, V. P.** Authentication of FEM in metal cutting. Finite Element Method in Manufacturing Processes // V.P. Astakhov, J.P. Davim. - New York: Wiley. – 2011. - P. 1-43.
89. **Astakhov, V. P.** Geometry of single-point turning tools and drills. / V.P. Astakhov // Fundamentals and practical applications. London: Springer. - 2010.- P. 565.
90. **Astakhov, V. P.** Machinability: existing and advanced concepts / Machinability of advanced materials / V.P. Astakhov, J.P. Davim // - London: Waley.- 2014. - P. 1-56.
91. **Astakhov, V. P.** Tribology of metal cutting / V.P. Astakhov // London: Elsevier. - 2006. - P. 392. - ISBN 9780444528810.
92. **Atkins, A. G.** Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems / A.G.

- Atkins // International Journal of Mechanical Science. - Vol. 43. -2003. P. - 396.
93. **Bakhno A. L.** More Precise Reaming of Holes in Welded Components / A.L. Bakhno, A.O. Chuprikov, A.S. Yamnikov, A.S. Vasilyev // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39. – No 11. – P. 990-992. – DOI 10.3103/S1068798X19110042.
94. **Bogomolov, M. N.** Improving the Processing of Thin Wall Sleeves / M. Bogomolov, A. Malikov, A. Yamnikov, A. Brailov // Smart Innovation, Systems and Technologies. – 2022. – Vol. 247. – P. 119-127. – DOI 10.1007/978-981-16-3844-2_13.
95. **Bogomolov, M. N.** Reducing the dynamic loads impact on themilled thin-wall sleeve surface quality / M. Bogomolov, A. Yamnikov and O. Yamnikova. - Текст: непосредственный // Cite as: AIP Conference Proceedings 2188 050012 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138439>.
96. **Bykov, G. T.** Vibrational stability in turning thin-walled pipe by multicutter heads / G. T. Bykov, A. S. Yamnikov, O. A. Yamnikova, N. B. Dorokhin // Russian Engineering Research. – 2010. – Vol. 30. – No 3. – P. 296-299. – DOI 10.3103/S1068798X10030238.
97. **Comak, A.** Modeling dynamics and stability of variable pitch and helix milling tools for development of a design method to maximize chatter stability / A. Comak, E. Budak // Precision Engineerin. – 2017. - № 47. - P. 459-468.
98. **Kalinski, K. J.** High speed milling vibration surveillance with the use of the map of optimal spindle speeds / K. Kalinski, M. Mazur, M. Galewski // Proceedings of the 8th International Conference on High Speed Machining. – ENIM. – Metz. - France. - 2010. - P. 300-305.
99. **Kalinski, K. J.** Optimal spindle speed determination for vibration reduction during ball-end milling of flexible detailsInternational / K.J. Kalinski, M.A.

- Galewski // Journal of Machine Tools and Manufacture. - V. 92. - May 2015. - P. 19-30.
100. **Kozlov, V.** Strength of cutting tool in titanium alloy machining / V. Kozlov, J. Zhang // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 427-431. – DOI 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.427.
101. **Leontiev, B. V.** Cutting Process Management to Remove Vibrations / B.V. Leontiev, A.N. Leontieva //, Vologodinsky Conference. - Far East Federal University. - Vladivostok. – 2012. - pp. 159-162.
102. **Liu, X.** An Analytical Model for the Prediction of Minimum Chip Thickness in Micromachining / X. Liu, R.E. DeVor, S.G. Kapoor // Journal of Manufacturing Science and Engineering. - 2006. - № 128. - P. 474 – 481.
103. **Melnik, Y.** Determination of the stress state in the deformation zone under local loading / Yu. Melnik, S. Zaides, N. Bobrovskij [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Krasnoyarsk, 20–22 июня 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 315. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 52080. – DOI 10.1088/1755-1315/315/5/052080.
104. **Murashkin, L. S.** Applied Non-Linear Mechanics of Machine Tools / L.S. Murashkin, S.L. Murashkin // Mashinostroeniye Publishing Leningrad Office. – Leningrad. - 1977. - 192 p.
105. **Prodan, V.D.** Radial deformation of an annular gasket during its axial / V.D. Prodan, A.V. Vasiliev, G.V. Bozhko // Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie.- 2011. - No. 11.- pp. 41-44.
106. **SANDVIK COROMANT.** Высокопроизводительная обработка металлов резанием: Учебное пособие/под ред. к.т.н. доц. Д.В. Виноградова. – Москва: Полиграфия, 2003.- 301
107. **Shchurov, I. A.** SPH-Simulation of the Fiber-reinforced Composite Workpiece Cutting for the Surface Quality Improvement / I.A. Shchurov,

- A.V. Nikonov, I.S. Boldyrev // 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016), Chelyabinsk, 19–20 мая 2016 года. – Chelyabinsk: Elsevier Ltd, 2016. – P. 860-865. – DOI 10.1016/j.proeng.2016.07.029.
108. **Shchurov, I. A.** SPH modeling of chip formation in cutting unidirectional fiber-reinforced composite / I.A. Shchurov, A.V. Nikonov, I.S. Boldyrev, D.V. Ardashev // Russian Engineering Research. – 2016. – Vol. 36. – No 10. – P. 883-887. – DOI 10.3103/S1068798X1610018X.
109. **Wu, S.** Experimental study of thin wall milling chatter stability nonlinear criterion / S. Wu, R. Li, X. Liu, L. Yang, M. Zhu // Procedia CIRP. - 2016. - Vol. 56.- P. 422–427.
110. **Yamnikov, A. S.** Chucks for thin-walled blanks / A.S. Yamnikov, A.O. Chuprikov // Russian Engineering Research. – 2015. – Vol. 35. – No 11. – P. 838-840. – DOI 10.3103/S1068798X15110179.
111. **Yamnikov, A. S.** Errors in Clamping Thin-Walled Pipe / A.S. Yamnikov, E.N. Rodionova, O.A. Yamnikova, I.A. Matveev // Russian Engineering Research. – 2019. – Vol. 39. – No 11. – P. 966-969. – DOI 10.3103/S1068798X19110200.
112. **Yamnikov, A. S.** Min Axial Interference Measurement in Elastic Elements of Vibration-Damping Mandrels for Thin-Wall Shell / A.S. Yamnikov, M.N. Bogomolov // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021) : ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Vol. 2. – Челябинск: Springer, 2022. – P. 81-89. – DOI 10.1007/978-3-030-85230-6_11.
113. **Yamnikov, A. S.** Simulation of oscillation frequency effects on complex shape part milling / A. S. Yamnikov, M. N. Bogomolov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : 16, Rostov-on-Don, 11–13

- сентября 2020 года. – Rostov-on-Don, 2021. – P. 012006. – DOI 10.1088/1757-899X/1029/1/012006.
114. **Yamnikov, A. S.** The Effect of Errors of the Form and Position of the Base Surfaces of a Composite Axisymmetric Body on the Size of an Adjacent Contour / A. S. Yamnikov, E. N. Rodionova, O. A. Yamnikova, I. A. Matveev // *Measurement Techniques*. – 2019. – Vol. 62. – No 8. – P. 692-696. – DOI 10.1007/s11018-019-01680-4.
115. **Yang, Y.** Chatter prediction for the peripheral milling of thin-walled workpieces with curved surfaces / Y. Yang, W-H. Zhang, Y-Ch. Ma, M. Wan // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. - 2016. - V. 109. - P. 36–48.
116. **Yusoff, A. R.** Identifying bifurcation behavior during machining process for an irregular milling tool geometry / A.R. Yusoff // *Measurement*. - 2016. - Vol. 93. - P. 57–66.
117. **Zagórski, I.** Artificial neural network modelling of vibration in the milling of AZ91D alloy / I. Zagórski, M. Kulisz, A. Semeniuk, A. Malec // *Advances in Science and Technology. Research Journal*. - V. 11. - Iss. 3. - 2017. - P. 261–269. DOI: 10.12913/22998624/76546.
118. **Zaides, S.** Automated complex for stabilized straightening of low-stiff cylindrical parts / S. Zaides, Le. H. Quang, N. Bobrovskij, P. Melnikov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Workshop "Advanced Technologies in Material Science, Mechanical and Automation Engineering – MIP: Engineering – 2019"*, Krasnoyarsk, 04–06 апреля 2019 года / Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Vol. 537. – Krasnoyarsk: Institute of Physics and IOP Publishing Limited, 2019. – P. 22078. – DOI 10.1088/1757-899X/537/2/022078.
119. **Zakovorotny, V. L.** Evolution of the dynamic cutting system with irreversible energy transformation in the machining zone / V.L.

- Zakovorotny, V.E. Gvindjiliya // Russian Engineering Research.- 39. - 2019. - №5. - P. 423-430.
120. **Асташев, В. К.** Термомеханическая модель возбуждения автоколебаний при обработке металлов резанием / В.К. Асташев, Г.К. Корендясев, В.И. Ерофеев - Текст: электронный // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. - 2013. С. 29–35. <https://elibrary.ru/item.asp?id=20505906> - Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU.
121. **Внуков, Ю. Н.** Разработка методики оценки уровня автоколебаний тонкостенной детали при ее концевом фрезеровании / Ю.Н. Внуков, А.И. Гермашев, С.И. Дядя, Е.Б. Козлова, П.А. Каморкин - Текст: электронный // Сучасні технології в машинобудуванні. - 2015. - Вип. 10. - С. 36–44. - URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Stvm_2015_10_3.
122. **Грубый, С. В.** Расчет сил и момента резания при фрезеровании концевыми фрезами // С.В. Грубый. – DOI 10.18698/0536-1044-2020-10-26-37. - Текст: электронный // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. - 2020. - №10(727). – С 26-37. - URL: <http://izvuzmash.ru/articles/1790/1790.pdf> (дата обращения: 27.07.2021).
123. **КБ Кайтек** [сайт]. - 2021. - URL <https://caetec.ru/calconline/raschet-trub-pod-davleniem.html/> (дата обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.
124. **Метизы и крепеж:** https://metiz-bearing.ru/vidsoedinenie/Silovye_sootnosheniya_vintovoi_pary.html (дата обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.
125. **Оборудование для производства метизов.** [Электронный ресурс] URL: / http://нашаоснастка.рф/catalog/frezernaya_osnastka. Дата обращения 18.12.2018.
126. **Основы технологии машиностроения** [сайт] - 2021.- URL: http://osntm.ru/cp_xp_up_np.html (09.06.2021) - Текст: электронный

127. **Производство РТИ** [сайт]. - 2021.-
URL:<https://rezinaplast.ru/articles/konstruirovanie-rezinotekhnicheskikh-izdeliy>-обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.
128. **Промойл** - Электронный каталог компании [Электронный ресурс] -
<https://promoil.com/catalog/frezernye-stanki/vertikalnye-frezernye/frezernyyu-standok-s-chpu-sr3xp/> (дата обращения: 16.12.2021).
129. **Профилومتر-hommel-etamic w5**. [электронный ресурс]. URL:
https://www.geo-ndt.ru/catalog-25-izmeriteli-sherohovatosti-profilometri-profilemeri/hommel_etamic_w5.htm . Дата обращения 09.09.2022.
130. **Энциклопедия по машиностроению XXL** [сайт] - 2021.- URL
<https://mash-xxl.info/info/422443/> (дата обращения: 01.07.2022).
131. **COMSOL** [сайт]. Теория и механизмы демпфирования в механике конструкций - 2021.- URL: <https://www.comsol.ru/blogs/damping-in-structural-dynamics-theory-and-sources/> (дата обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.
132. **Stanoktehpasport** [сайт]. - 2021.- URL:
<https://www.stanoktehpasport.ru/16k20-chertezhi/> (дата обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.
133. **Helpiks** [сайт]. - 2021. - URL <https://helpiks.org/2-71601.html>, (дата обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.
134. **Oil-club** [сайт]. - 2021.- URL: <https://www.oil-club.ru/forum/topic/140-poliuretan-vs-rezina/> (дата обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.
135. **Politec** - Электронный каталог компании «Politec» [Электронный ресурс] - <https://politek-service.ru/catalog/> (дата обращения: 16.12.2021). - Текст: электронный.
136. **Rotorica** [сайт]. - 2021.- URL: <http://ro-tools.ru/brand/matador> (дата обращения: 27.07.2021). - Текст: электронный.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1. СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ

Таблица П. 1.1 - Сравнение физико-механических свойств резины 1Н-1ТМКЩ-С-10 и полиуретана СКУ-ФЭ-4 [121]

Наименование показателя	Резина	Полиуретан
Твердость по Шору (шкала А)	65-75	40-98*
Модуль упругости при растяжении 100%	12	29
Эластичность по отскоку (%)	30	40
Предел прочности при разрыве (кг/см ²)	115	312
Удлинение при разрыве (%)	300	540
Прочность на раздир (метод С), Н/мм	20	58
Коэффициент морозостойкости по эластичному восстановлению после сжатия, при -50°С	0,2	0,45
Абразивная стойкость (Шабер Н22)	2	10

Таблица П.1.2 – Зависимость модуля резины при сжатии от твердости резины [127]

Твердость по Шору. Прибор ТМ-2	Твердость по прибору ТШМ-2, кгс/см ²	Твердость по СИ (JRHND)	Модуль при сжатии, МПа
40	6,4...4,7	40	1,5
50	7,3...5,5	50	2,5
60	10,0...7,2	60	4,5
70	11,4...9,5	70	7,0
80	22,0...14,8	80	10,0
90	39,8...23,0	90	21,0

Таблица П.1.3. - Резьба трапецеидальная однозаходная. Основные размеры, мм [18]

Номинальный диаметр резьбы d	Шаг P	Диаметр резьбы				
		наружный		средний	внутренний	
		d	D ₄	d ₂ =D ₂	d ₃	D ₁
8	1,5	8,000	8,300	7,250	6,200	6,500
	2	8,000	8,500	7,000	5,500	6,000
9	1,5	9,000	9,300	8,250	7,200	7,500
	2	9,000	9,500	8,000	6,500	7,000
10	1,5	10,000	10,300	9,250	8,200	8,500
	2	10,000	10,500	9,000	7,500	8,000

11	2	11,000	11,500	10,000	8,500	9,000
	3	11,000	11,500	9,500	7,500	8,000
12	2	12,000	12,500	11,000	9,500	10,000
	3	12,000	12,500	10,500	8,500	9,000
14	2	14,000	14,500	13,000	11,500	12,000
	3	14,000	14,500	12,500	10,500	11,000
16	2	16,000	16,500	15,000	13,500	14,000
	4	16,000	16,500	14,000	11,500	12,000

Таблица П.1.4 – Физико-механические характеристики полиуретана
СКУ-ФЭ-4[127]

Показатель	Значение
Твердость по Шору, усл.ед.	65-85
Предел прочности при растяжении, МПа	20-26
Относительное удлинение при разрыве, %	500-780
Сопротивление раздиру, Н/мм	120
Условное напряжение при 100% удлинении (не менее), МПа	2
Относительная остаточная деформация после разрыва (не более), МПа	15
Температурный диапазон, °С	-40 +80

Таблица П.1. 5 - Элемент программы для фрезерной операции с ЧПУ

<i>T10M06(30 SPHERICAL / BALL-NOSED ENDMILL)</i>	<i>Z51.57</i>	<i>Y-19.978</i>
<i>G17</i>	<i>Y-20.84</i>	<i>X-165</i>
<i>(UNLOCK)</i>	<i>X-104</i>	<i>Z51.729</i>
<i>G00G90G54A38.035S3000M03</i>	<i>Z51.576</i>	<i>Y-19.886</i>
<i>X-165Y-21.612</i>	<i>Y-20.742</i>	<i>X-104</i>
<i>(LOCK)</i>	<i>X-165</i>	<i>X-165</i>
<i>G43H10Z80.T13</i>	<i>Z51.584</i>	<i>Z51.901</i>
<i>Z56.612M8</i>	<i>Y-20.645Z51.583</i>	<i>Y-19.288</i>
<i>G94G01Z51.612F1000.</i>	<i>X-104</i>	<i>X-104</i>
<i>X-104F450.</i>	<i>Z51.594</i>	<i>Z52.069</i>
<i>Y-21.517Z51.598F4000</i>	<i>Y-20.549</i>	<i>Y-18.689</i>
<i>X-165</i>	<i>X-165</i>	<i>X-165</i>
	<i>Z51.606</i>	<i>Z52.231</i>

Z51.599	Y-20.452	Y-18.087
Y-21.421Z51.587	X-104	X-104
X-104	Z51.621	Z52.388
Z51.588	Y-20.356	Y-17.483
Y-21.325Z51.579	X-165	X-165
X-165	Z51.638	Z52.54
Y-21.228Z51.572	Y-20.261	Y-16.877
X-104	X-104	X-104
Z51.573	Z51.657	Z52.687
Y-21.131Z51.568	Y-20.166	Y-16.269
X-165	X-165	X-165
Y-21.034Z51.567	Z51.679	Z52.829
X-104	Y-20.072	Y-15.659
Y-20.937	X-104	X-104
X-165	Z51.703	Z52.965
Y-15.048	Z54.031	X-104
X-165	Y-8.845	Z54.542
Z53.096	X-165	Y-2.536
Y-14.434	Z54.108	X-165
X-104	Y-8.218	Z54.562
Z53.222	X-104	Y-1.903
Y-13.819	Z54.178	X-104
X-165	Y-7.589	Z54.576
Z53.342	X-165	Y-1.269
Y-13.202	Z54.244	X-165
X-104	Y-6.96	Z54.585
Z53.457	X-104	Y-.635
Y-12.584	Z54.303	X-104
X-165	Y-6.33	Z54.587
Z53.566	X-165	Y0.
Y-11.964	Z54.357	X-165
X-104	Y-5.699	Y.634Z54.585
Z53.67	X-104	X-104
Y-11.343	Z54.405	Y1.268Z54.576
X-165	Y-5.068	X-165
Z53.769	X-165	Y1.902Z54.562
Y-10.72	Z54.448	X-104
X-104	Y-4.436	Y2.536Z54.542
Z53.862	X-104	X-165
Y-10.096	Z54.485	Y3.169
X-165	Y-3.803	Z54.516
Z53.949	X-165	X-104
Y-9.471	Z54.516	Y3.803
X-104	Y-3.17	Z54.485
X-165	Z53.862	Y16.269
Y4.435	X-165	Z52.687
Z54.448	Y10.72	X-165
X-104	Z53.769	Y16.876
Y5.067	X-104	Z52.54
Z54.405	Y11.342	X-104
X-165	Z53.67	Y17.482

Y5.699	X-165	Z52.388
Z54.357	Y11.964	X-165
X-104	Z53.566	Y18.086
Y6.33	X-104	Z52.231
Z54.303	Y12.583	X-104
X-165	Z53.457	Y18.688
Y6.96	X-165	Z52.069
Z54.244	Y13.202	X-165
X-104	Z53.342	Y19.288
Y7.589	X-104	Z51.901
Z54.178	Y13.818	X-104
X-165	Z53.222	Y19.885
Y8.217	X-165	Z51.729
Z54.108	Y14.434	X-165
X-104	Z53.096	X-104
Y8.844	X-104	Y19.978
Z54.031	Y15.047	Z51.703
X-165	Z52.965	X-165
Y9.471	X-165	Y20.071Z51.679
Z53.949	Y15.659	X-104
X-104	Z52.829	Y20.165Z51.657
Y10.096	X-104	X-165
Y20.26Z51.638	Z51.588	
X-104	Y21.42	
Y20.356Z51.621	X-104	
X-165	Z51.599	
Y20.452Z51.606	Y21.516	
X-104	X-165	
Y20.548Z51.594	Z51.612	
X-165	Y21.612	
Y20.645Z51.584	X-104	
X-104	G00Z56.612	
Y20.742Z51.576	Z80.	
X-165	(UNLOCK)	
Y20.839Z51.57	G91A-90	
X-104		
Z51.571		
Y20.936Z51.567		
X-165		
Z51.568		
Y21.033Z51.567		
X-104		
Z51.569		
Y21.131Z51.568		
X-165		
Z51.573		
Y21.227		
X-104		
Z51.579		
Y21.324		

Рисунок П.1. 6 – Акт внедрения разработанной оправки

«УТВЕРЖДАЮ»

Заместитель директора завода
по производству №2 АО «НПО
«СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»

/Козловский А.С./

« » 2022 г.

Акт внедрения приспособления на операции фрезерования детали
«Цилиндр», разработанного Богомоловым М.Н., обучающемся в целевой
аспирантуре ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет»
по направлению АО «НПО «СПЛАВ» им. А.Н. Ганичева»

Составлен комиссией:

Председатель комиссии:

Начальник производства №2	Полуев Н.Н.
---------------------------	-------------

Члены комиссии:

Начальник цеха №33	Ташлыков С.В.
Контрольный мастер	Черепкова Т.В.
Ведущий инженер - технолог	Калинин П.А.
Мастер цеха №33	Хохлов А.И.
Инженер-технолог по по техоснастке и метрологии	Кузоватова Л.И.

9 августа 2022 г. была произведена партия деталей в количестве 10 шт.
Проверка геометрических параметров и конструктивных размеров
детали показала, что приспособление для операции фрезерования детали
«Цилиндр» обеспечивает их изготовление в полном соответствии с
требованиями конструкторской документации и технических условий.

Подписи членов комиссии

Председатель комиссии

Члены комиссии




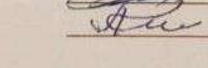
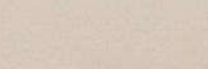

	/Н.Н. Полуев/
	/С.В. Ташлыков/
	/Т.В. Черепкова/
	/П.А. Калинин/
	/А.И. Хохлов/
	/Л.И. Кузоватова/

Рисунок П.1. 7 – Сертификат на патент

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** (11) **2 688 019** (13) **C1**(51) МПК
B23B 31/40 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B23B 31/40 (2019.02)

(21)(22) Заявка: 2018142975, 05.12.2018

(24) Дата начала отчета срока действия патента:
05.12.2018Дата регистрации:
17.05.2019

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.12.2018

(45) Опубликовано: 17.05.2019 Бюл. № 14

Адрес для переписки:

300012, г. Тула, пр. Ленина, 92, Федеральное
государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования "Тульский
государственный университет" (ТулГУ),
патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):

Ямников Александр Сергеевич (RU),
Чуприков Артём Олегович (RU),
Богомолов Максим Николаевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

**Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Тульский государственный
университет" (ТулГУ)** (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: CN 104043977 A, 17.09.2014. SU
841402 A1, 23.05.1981. SU 1648724 A1,
15.03.1991. SU 1653906 A1, 07.06.1991. CN
104014831 A, 03.09.2014.

(54) Оправка для закрепления тонкостенных цилиндрических заготовок

(57) Реферат:

Оправка содержит центральный стержень и зажимной элемент. Оправка снабжена эластичной втулкой. Центральный стержень выполнен с хвостовиком, в средней части центрального стержня выполнена кольцевая ступень с аксиальными штифтами. На торце эластичной втулки радиально выполнены глухие отверстия, в которые для размещения упомянутых аксиальных штифтов кольцевой ступени. На переднем торце центрального стержня базируется зажимной элемент, выполненный в виде крышки с центральным отверстием. На крышке по кругу равномерно выполнены резьбовые отверстия с

ввинченными в них зажимными винтами. При этом зажимная крышка через центральное отверстие прижата шпилькой и гайкой к переднему торцу центрального стержня. Между эластичной втулкой и торцами зажимных винтов размещена распорная шайба с пазами, в которые ввернуты зажимные винты прижатии эластичной втулки. Эластичная втулка может быть выполнена из упругоэластичного материала или из полиуретана. Достигается повышение точности обработки тонкостенных цилиндрических заготовок. 2 з.п. ф-лы, 2 ил.

RU 2 688 019 C 1

RU 2 688 019 C 1