

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет»

На правах рукописи

Осминко Дмитрий Александрович



**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ВНУТРЕННИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СВАРНЫХ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ СТАЛЕЙ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель,
доктор технических наук,
профессор В.В. Максаров

Санкт-Петербург – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РАСТАЧИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ, СОСТОЯЩИХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	15
1.1 Особенности процесса растачивания внутренних прецизионных отверстий на токарных станках.....	15
1.2 Промышленное использование деталей, сваренных из разнородных материалов.....	17
1.3 Существующие представления о природе возникновения вибраций в технологическом процессе при расточной операции.....	25
1.4 Способы обеспечения шероховатости поверхности и точности формы посредством снижения вибраций при растачивании.....	27
1.4.1 Технологическое обеспечение качественных показателей внутренних поверхностей посредством использования вибропоглощающих материалов, геометрических форм инструмента и элементов остатка.....	29
1.4.2 Технологическое обеспечение качественных показателей внутренних поверхностей посредством использования пассивного виброгашения.....	32
1.4.3 Технологическое обеспечение качественных показателей внутренних поверхностей посредством использования активного динамического виброгашения.....	40
1.5 Выводы по первой главе.....	41
ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ТОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТОЧНОЙ ОПРАВКИ В НАПРЯЖЁННО- ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ.....	44
2.1 Обоснование выбора материала для корпуса антивибрационной расточной оправки.....	46

2.2	Обоснование выбора конструкционного демпфирования для антивибрационной расточной оправки.....	55
2.3	Технология изготовления антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом.....	59
2.3.1	Трёхмерное моделирование конструкции напряжённо- деформированной оправки.....	61
2.4	Определение динамических параметров антивибрационной расточной оправки при различной степени затяжки разжимного конуса.....	66
2.4.1	Определение жёсткости антивибрационной расточной оправки при различной степени затяжки разжимного конуса.....	66
2.4.2	Определение демпфирующих свойств и приведённой массы антивибрационной расточной оправки при различной степени затяжки разжимного конуса.....	70
2.5	Определение собственных мод антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом в диапазоне.....	77
2.5.1	Выбор типа конечного элемента.....	78
2.5.2	Определение собственных мод антивибрационной оправки на базе программы COMSOL Multiphysics.....	80
2.6	Предварительные производственные испытания антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом.....	86
2.7	Выводы по второй главе.....	89
ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ ТИПА «ВТУЛКА» С УЧЁТОМ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЙ ОПРАВКИ.....		91
3.1	Составление уравнения движения для парциальной подсистемы «инструмент» в нормальном и касательном контуре к поверхности заготовки.....	93
3.2	Составление уравнения запаздывания силы резания по отношению к силе трения, связывающее нормальный и касательный контур.....	96

3.3	Учёт напряжённно-деформированного состояния антивибрационной расточной оправки и разнородности обрабатываемой заготовки в математической модели.....	106
3.4	Составление передаточных функции линейных дифференциальных уравнений.....	112
3.5	Установление влияния технологических параметров обработки антивибрационным инструментом на устойчивость процесса растачивания.....	114
3.6	Выводы по третьей главе.....	119
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПРАВКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ДЕТАЛИ ТИПА «ВТУЛКА» В ПРОЦЕССЕ РАСТАЧИВАНИЯ.....		
121		
4.1	Исследования влияния степени напряжённно-деформированного состояния оправки на процесс динамической устойчивости растачивания отверстия...	121
4.2	Исследования влияния степени напряжённно-деформированного состояния оправки на параметры шероховатости внутренней прецизионной поверхности.....	128
4.3	Исследования точности растачиваемого отверстия в деталях, сваренных из разнородных сталей.....	135
4.4	Рекомендации по технологии изготовления деталей, сваренных из разнородных сталей, с применением напряжённно-деформированной расточной оправки.....	138
4.4.1	Алгоритм по выбору оптимального припуска под механическую обработку отверстий сварных деталей, состоящих из двух элементов.....	140
4.5	Сравнение результатов производительности при использовании базовой технологии и совершенствованной технологии с применением напряжённно-деформированного расточного инструмента.....	145

4.6 Выводы по четвёртой главе.....	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	154
ПРИЛОЖЕНИЕ А Технические характеристики приборов.....	167
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технические характеристики станков.....	170
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент «Оправка для растачивания ступенчатых глубоких отверстий в труднообрабатываемых деталях, сваренных из разнородных материалов».....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о внедрении результатов работы в учебный процесс.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Д Акты о внедрении результатов работы в производство.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Е Базовый технологический процесс изготовления детали «Труба».....	177
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж Совершенствованный технологический процесс изготовления детали «Труба».....	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации

В настоящее время во многих отраслях промышленности: горном машиностроении, авиационной промышленности, приборостроении, и других – нашли широкое применение детали, сваренные из разнородных сталей. Целевое использование разнородных материалов в основных узлах изделия ведёт к снижению металлоёмкости, массы конструкции, а также обеспечивает специальные физико-механические свойства, необходимые для решения технологических и конструкционных задач.

Разумеется, в условиях конкурентного рынка услуг по металлообработке, к конкурентоспособным технологическим процессам таких ответственных деталей, сваренных из разнородных материалов, предъявляются высокие требования: ограничение использования дорогостоящего металлорежущего оборудования и сокращение машинного времени с сохранением предъявляемых технологических параметров.

В настоящих технологических процессах сталкиваются с серьёзными затруднениями изготовления подобных деталей, связанных с потерей точности вследствие растачивания комбинированных внутренних поверхностей, состоящих из разнородных материалов, а большой вылет инструмента при растачивании таких отверстий делает такой инструмент динамически неустойчивым звеном в технологической системе.

Устранить вибрации в процессе растачивания деталей, сваренных из разнородных сталей, позволит инструментальное оснащение, основанное на использовании предварительного напряжённо-деформированного состояния периферии расточной оправки, имеющего ориентированные диссипативные свойства по направлению сил резания, что снизит амплитуду колебательных процессов и обеспечит заданную точность и шероховатость внутренних прецизионных поверхностей.

Степень разработанности темы исследования

Обеспечением стабильности качества внутренних поверхностей при

механической обработке занимались такие учёные как Васин С.А., Эльясберг М.Е., Тлустог И., Тобиас С. и др. в частности глубокими отверстиями – занимались такие исследователи как Минков М.А., Подураев В.Н., Кижняев Ю.И., Уткин Н.Ф. и др. С середины 70-х годов в зарубежных странах для комплексного решения задач по механической обработке деталей сложной конфигурации было создано специальное объединение «Boring and Trepanning Association» (BTA). На сегодняшний день BTA занимается разработкой и совершенствованием существующих технологий сверления и растачивания глубоких отверстий. В это объединение входят такие компании как Sandvik Coromant, Iskar, SECO Tools AB и др.

В частности, компания Sandvik Coromant для решения проблем с вибрациями при больших вылетах инструмента использует серию специальных антивибрационных оправок Silent Tools, позволяющих в большинстве случаев снизить вибрации без потери производительности.

Несмотря на большое количество публикаций и статей в области гашения вибраций, вопросы, связанные с виброустойчивостью инструмента при растачивании отверстий, состоящих из разнородных материалов, остаются практически нерешёнными. Во многих работах технология оказывалась достаточно сложной для производства, ввиду прерывистости и дискретности технологических процессов. Переход к непрерывным автоматизированным технологическим процессам позволит увеличить масштабы производства и качество продукции.

Объектом исследования является точность формы и шероховатость внутренних прецизионных поверхностей в технологическом процессе изготовления сварных деталей, состоящих из разнородных сталей, за счёт применения специального инструментального оснащения, обладающего диссипативными свойствами.

Предметом исследования являются параметры и характеристики точности формы и шероховатости внутренних прецизионных поверхностей

деталей, состоящих из разнородных материалов, в технологическом процессе механической обработки.

Целью исследования является технологическое обеспечение шероховатости и точности внутренних прецизионных поверхностей деталей, сваренных из разнородных сталей, на основе использования предварительно-напряжённого состояния расточной оправки для снижения интенсивности колебательных процессов.

Идея работы заключается в научно обоснованной оценке влияния режимов обработки процесса растачивания и степени напряжённо-деформированного состояния предлагаемой оправки, на точность и качество внутренних поверхностей детали сваренной из разнородных сталей; интеграции в стойку станка с ЧПУ специального алгоритма совершенствованного технологического процесса растачивания отверстий в разнородных деталях, упрощающего осуществление операции оператором станка.

Задачи исследования:

1. Обобщить и провести анализ экспериментальных и теоретических данных, описанных в литературных источниках, связанных с темой диссертационного исследования;

2. Осуществить теоретические исследования на базе современных машиностроительных предприятий страны по определению проблем стабильности процесса растачивания внутренних поверхностей деталей, сваренных из разнородных сталей, не обеспечивающих высокую точность и качество прецизионных глухих и сквозных отверстий;

3. Разработать способ технологического обеспечения геометрических параметров формы внутренних прецизионных поверхностей при растачивании отверстий в деталях, состоящих из разнородных сталей, посредством использования специального инструмента, обладающего диссипативными свойствами;

4. Разработать расточную оправку, находящуюся в определённом фиксированном напряжённо-деформированном состоянии, для обеспечения подавления возмущений, возникающих в процессе растачивания разнородных обрабатываемых сталей;

5. Создать математическую модель, адекватно учитывающую влияние степени предварительного напряжённо-деформированного состояния, на демпфирующие свойства и жёсткость расточной оправки, что обеспечивает снижение автоколебательного процесса в процессе механической обработке сварных деталей;

6. Установить зависимости между демпфирующим свойством инструментального оснащения и степенью напряжённо-деформированного состояния в расточной оправке, влияющие на технологическое обеспечение шероховатости прецизионных поверхностей;

7. Предложить практические рекомендации по настройке инструментального оснащения и технологию, которые снизят влияние колебаний подсистемы «инструмент» на качество и точность изготовления прецизионных поверхностей из разнородных сталей.

Методология и методы исследования опирались на научные основы технологии машиностроения, современные положения теории резания материалов, статистические методы исследования и способы математического моделирования.

Представленные экспериментальные исследования осуществлялись с учётом общепринятых условий (ГОСТ 24026-80) с использованием современных средств измерения.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные сведения диссертационного исследования предьявлялись на приведённых ниже научно-практических конференциях: Международном семинаре-симпозиуме «Нанофизика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); IV Международной научно-практической конференции «Инновации на транспорте и в машиностроении»; Международной научно-технической

конференции «МТЕТ-2016» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); Международной научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017» (г. Санкт-Петербург, 2017 г.); Форуме проектов программ Союзного государства – VI Форуме вузов инженерно-технологического профиля «Глобальная энергетика: Партнёрство и устойчивое развитие стран и технологий» (г. Минск, 2017 г.); Международной научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2019» (Круглый стол молодых учёных).

Основные положения работы и результаты исследований отражены в НИР № 9.10520.2018/11.12. «Разработка системы динамической стабилизации процесса резания разнородных материалов и сплавов на основе лазерной локальной метастабильности в управляемых робототехнических комплексах на станках с ЧПУ» в соответствии с приказом от федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (Горный университет) 10.02.2018 г. №878 адм.

В полном объёме диссертация заслушана и одобрена на заседании кафедры машиностроения Горного университета в 2019 г. Апробирование данного технологического решения проводилось в учебном процессе при обучении магистров по направлению 15.04.01 – «Машиностроение», по программе подготовке «Технология автоматизированного машиностроения» по дисциплине «Научные основы современного машиностроения» Горного университета.

Научная новизна работы заключается в выявлении зависимости между шероховатостью изготовленной внутренней поверхности детали и степенью напряжённо-деформированного состояния в расточной оправке, что позволит усовершенствовать технологию растачивания внутренних прецизионных поверхностей в деталях, состоящих из разнородных сталей

Теоретическая и практическая значимость работы

Предложенная технология, на основе использования специального инструментального оснащения, обладающего напряжённо-деформированным состоянием, позволит на каждом из участков отверстия быстрее реагировать инструменту на различного рода возмущения, которые возникают при переходе из одного материала в другой, и снизит высокочастотный колебательный процесс, который возникает при растачивании глубоких отверстий, тем самым обеспечив требуемые параметры качества и точности внутренней поверхности сварной детали.

Для оценки влияния технологических параметров резания на обеспечение требуемых показателей качества и точности обработки внутренних прецизионных поверхностей деталей, состоящих из разнородных материалов, применяется разработанная математическая модель, учитывающая переходные процессы в зоне стружкообразования.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная двухконтурная математическая модель динамической системы механической обработки, учитывающая механические свойства элементов, составляющих сварную деталь, воздействие режимов механической обработки и степени напряжённо-деформированного состояния расточной оправки на качество и точность обрабатываемых поверхностей, позволяет адекватно оценить влияние автоколебательного процесса на формирование шероховатости при технологическом процессе механической обработки отверстий в сварных деталях и подобрать рациональный диапазон степени затяжки расточного инструмента $M_{кр} = 60..90$ Н·м, обеспечивающего снижение амплитуды возмущений на 69 % по сравнению с соответствующими вибрациями при реализации базового технологического процесса растачивания.

2. Разработанный и реализованный на практике алгоритм, осуществляющий интегрированную технологическую операцию с помощью макропрограммирования в системе CNC типа Fanuc 21i-TD, включающую два

перехода по обработке сварной детали типа «втулка» из конструкционной стали 45 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т с применением инновационной оправки со степенью напряжённо-деформированного состояния при $M_{кр} = 90 \text{ Н}\cdot\text{м}$ и соответствующих режимов обработки (подача $S_{рез} = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{об}}$, скорость $V_{рез} = 160 \frac{\text{м}}{\text{мин}}$, глубина $t_{рез} = 0,35 \text{ мм}$), что позволяет обеспечивать точность отверстий по IT8-9 качеству со средним арифметическим отклонением профиля до 1 мкм при общем исходном припуске на обработку $\delta_{общ} = 0,7 \text{ мм}$.

Данные о публикациях автора. По результатам исследования опубликовано 6 печатных работ, в том числе две работы опубликованы в рецензируемом научном издании, входящем в перечень рекомендованных изданий ВАК Министерства науки и высшего образования РФ; получен 1 патент на изобретение.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложений. Основные материалы работы изложены на 182 страницах машинописного текста, в том числе содержат 16 таблиц, 59 рисунков, 122 наименования литературы и 7 приложений.

Соответствие паспорту специальности: работа соответствует п. 4 области исследования паспорта специальности 05.02.08 «Технология машиностроения» **«совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска»**, а также п. 7 **«технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин»**.

В первой главе проведён анализ современного состояния вопроса по растачиванию отверстий, к которым предъявляются жёсткие требования по качеству и точности поверхностей. Разбор конструкции детали «Труба» двухходового электромагнитного клапана, выявил, что к внутренним

поверхностям детали, сваренной из разнородных материалов, предъявляются высокие требования по качеству и точности. На основании предъявляемых требований к конструкциям, сваренным из разнородных материалов произведён анализ существующих методов и способов, позволяющих обеспечить заданное качество внутренних прецизионных поверхностей при растачивании отверстий в детали «Труба» посредством снижения уровня вибраций в технологической системе механической обработки. В соответствии с целью работы проведённый анализ позволил сформулировать задачи планируемых экспериментальных исследований.

Во второй главе рассматривается сущность метода обеспечения динамической стабильности технологической системы при растачивании внутренних прецизионных отверстий в деталях, состоящих из разнородных материалов, с использованием специального инструмента, обладающего напряжённо-деформированным состоянием. Базовым инструментальным оснащением поверхности сварных деталей плохо поддаются обработке, поэтому требуются дополнительные технологические решения по улучшению виброустойчивости процесса растачивания. Руководствуясь этой проблемой, разработана усовершенствованная технология обработки внутренних прецизионных поверхностей с использованием специального инструментального оснащения, основанного на предварительном напряжённо-деформируемом состоянии расточной оправки. Такое регулируемое состояние оправки позволяет управлять динамическими параметрами разработанной антивибрационной оправки для эффективного демпфирования вибраций, возникающих в процессе механической обработки.

В третьей главе показаны основные стадии разработки математической модели технологической системы механической обработки отверстий в деталях, сваренных из разнородных материалов: выявлены главные подсистемы, определены взаимосвязи между ними, установлены числа степеней свободы, необходимые для описания динамической системы.

В результате проведённых математических решений и аппроксимаций, была разработана оптимальная математическая модель технологической системы

При анализе динамической устойчивости технологической системы была произведена трансформация сложной многомерной математической модели в более упрощённую. Оценка влияния переходного процесса, обусловленного наличием границы, раздела между элементами сварной конструкции осуществлялась через тумблер, учитывающий в системе динамические и механические параметры разнородных участков. Поиск решения данной математической задачи выполнялся с учётом переходного процесса и осуществлялся в программной среде LabVIEW 2019.

В четвертой главе получены окончательные показатели экспериментальных исследований, описывающие работу усовершенствованного технологического процесса изготовления внутренних прецизионных поверхностей детали, сваренной из разнородных материалов. На основании проведённых исследований установлено, что при изготовлении деталей, состоящих из комбинированных поверхностей, с применением разработанной оправки в напряженно-деформированном состоянии, обеспечиваются заданные показатели качества поверхностного слоя изделия. Вышесказанное допускает возможность, при изготовлении деталей типа «втулка», состоящих из разнородных материалов, отказаться от ненужных переходов и перейти к непрерывным автоматизированным технологическим процессам, позволяя увеличить масштабы производства и качество продукции, что является актуальной задачей в условиях импортозамещения.

ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ РАСТАЧИВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ, СОСТОЯЩИХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

1.1 Особенности процесса растачивания внутренних прецизионных отверстий на токарных станках

Повышение эффективности процесса механической обработки на токарных станках сводится к оптимизации решения задач, которые позволяют увеличить производительность и снизить себестоимость обработки, повысить точность геометрических параметров и качество обрабатываемых поверхностей. Существующие инструментальные системы, которые используются при растачивании отверстий в деталях типа «втулок» и «цилиндров», зачастую не позволяют вести обработку на токарных станках при оптимальных режимах обработки. Одной из главных особенностей процесса растачивания является обработка расточным инструментом с большим вылетом, что является причиной его большой податливости под действием сил резания. Основной причиной низкой виброустойчивости инструмента в процессе растачивания следует считать низкую жёсткость инструментальной системы, так как жёсткость шпиндельного узла и суппорта достаточно высока [7, 8, 10]. При токарной обработке всегда рекомендуется использовать инструмент с минимально возможным вылетом из зоны закрепления инструмента и максимальным сечением оправки для увеличения жёсткости. Однако при растачивании вылет обусловлен, прежде всего, глубиной обрабатываемого отверстия, а увеличение сечения державки ограничено либо диаметром обрабатываемого отверстия, либо параметрами посадочного места в блоке револьверной головки станка с ЧПУ [12, 16]. Следствием указанных особенностей является низкая жёсткость инструмента

и недостаточная виброустойчивость процесса растачивания, что снижает параметры точности и качества обрабатываемых отверстий.

При растачивании на токарных станках появляются погрешности формы обрабатываемых отверстий, возникающие вследствие деформаций системы и её элементов. Погрешности механической обработки возникают в результате деформации элементов технологической системы. Общую податливость технологической системы при растачивании можно определить, суммируя смещение инструмента, вызванное действием сил резания на него, как на жёстко закреплённую консольную балку и смещения, которые возникают в шпиндельном узле и суппорте [48, 52]. Для определения устойчивости динамической системы следует рассматривать влияние переменных во времени сил резания на динамические деформации технологической системы механической обработки (ТСМО). В научных работах [6, 29, 107] посвящённых исследованиям влияния жёсткости технологической системы на виброустойчивость процесса растачивания проанализированы проблемы, возникающие при работе инструментов с большим вылетом, связанные с дисбалансом и упругими деформациями. Помимо жёсткости технологической системы, непосредственное влияние на интенсивность колебаний при растачивании оказывают режимы обработки [6, 19, 33]. В процессе растачивания отверстий, при неизменных условиях и режимах механической обработки, наблюдаются значительные по величине периодические и случайные изменения составляющих сил резания. Установлено, что диапазон этих отклонений составляет 20 – 30 % от средних значений, составляющих сил резания [25, 28]. При повышенном износе инструмента эти величины возрастают в 1,2 – 1,4 раза [26, 27]. Значительные изменения силы резания обуславливают увеличение волнистости и шероховатости обрабатываемой поверхности, понижают стойкость режущего инструмента.

При обработке расточным инструментом глухого глубокого отверстия в процессе механической обработки участвует только одно лезвие и поэтому

возникающие упругие перемещения инструмента не приводят к превышению диаметра отверстия. В этом состоит принципиальное отличие в формировании погрешности по сравнению с обработкой сквозных отверстий иным инструментальным оснащением [15, 50, 51]. В существующих исследованиях уделено недостаточно внимания анализу динамических характеристик процесса растачивания на токарных станках и их влиянию на эффективность обработки отверстий. Анализ литературных источников показал, что существует необходимость дополнительных исследований влияния колебаний, возникающих в процессе обработки растачиванием на качество обработанной поверхности, точность изготавливаемых деталей и износ инструмента. На основании исследования условий эксплуатации расточных резцов для токарных станков можно заключить, что для эффективной обработки растачиванием требуются усовершенствования, прежде всего, в подсистеме инструмента.

1.2 Промышленное использование деталей, сваренных из разнородных материалов

В настоящее время на различного рода отраслях промышленности достаточно широкое применение находят комбинированные детали из разнородных конструкционных материалов. При производстве подобных деталей главной технологической сложностью является инструментальное обеспечение и выбор способа механической обработки для воспроизводства заданных точностных и качественных показателей. Представленная группа деталей, изготавливаемых из разнородных конструкционных материалов, в том числе из различных сталей [36, 38, 24], к которым предъявляются особые конструкторские задачи для работы современных исполнительных механизмов в агрессивных средах, занимает особое положение в промышленности. В нефтегазовом секторе подобные изделия получили

распространение в области производства 2-ходовых электромагнитных запорных клапанов (Рисунок 1.1).

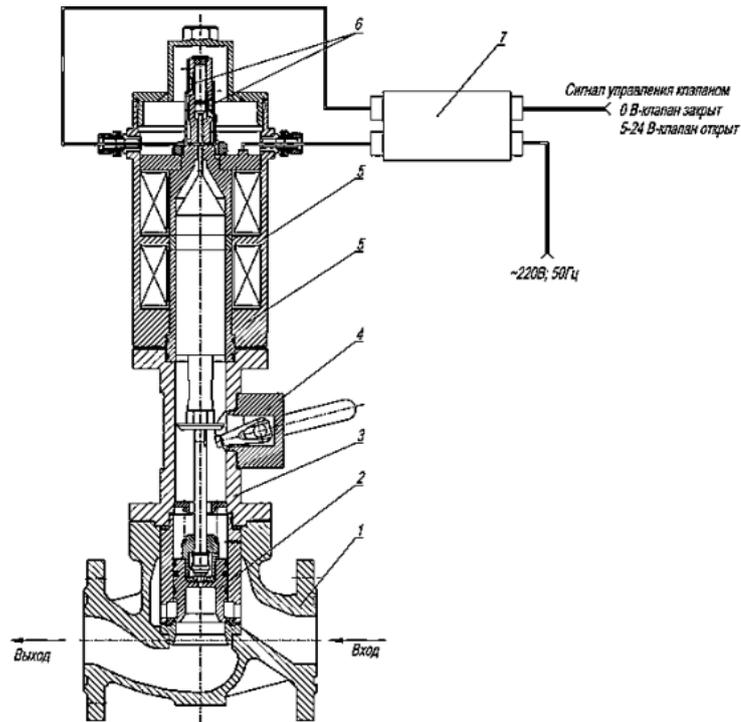


Рисунок 1.1 – Схема 2-ходового электромагнитного запорного клапана: 1 – корпус; 2 – запорный узел, 3 – крышка; 4 – ручной дублёр; 5 – электромагнит; 6 – сигнализатор состояния клапана; 7 – блок управления

В условиях импортозамещения приводной арматуры российского производства, которые не должны уступать по техническому уровню и надёжности зарубежным аналогам, нашли применение электромагнитные клапаны. Конструкции пневматических и электромеханических приводов клапанов с традиционной конструкцией клапана, используемых в конструкциях приводной арматуры известных зарубежных фирм, имеют серьёзный эксплуатационный недостаток – необходимость сальникового уплотнения выдвижного рабочего штока, не обеспечивающего долговременной надёжной герметизации внутренних рабочих полостей клапана относительно внешней среды из-за неизбежного износа материалов деталей штока и сальника [20, 98, 99]. Также к недостаткам пневмоприводных клапанов относится необходимость использования в системах управления:

- источника давления технологического воздуха, осушённого до точки росы минус
- 60 °С (для работы в северных регионах);
- большой пневмосети, включающей в себя дополнительное оборудование, которая охватывает все технологические установки и трубопроводы, на которых устанавливаются эти клапаны;
- преобразователей пневмосигналов в электрические и соответственно сложной и дорогостоящей системы управления.

Существенным недостатком клапанов с электромеханическими приводами является большая инерционность срабатывания передаточных механизмов, что не позволяет осуществлять быстрое аварийное закрытие (открытие) клапана.

В связи с этим в конструкции клапанов было внесено специальное конструкторское решение – применение сварных деталей, состоящих из разнородных сталей [20]. Это позволило обеспечить следующие важнейшие эксплуатационные преимущества:

- высокая герметичность конструкции клапана относительно окружающей среды из-за отсутствия в конструкции выдвижного штока необходимости его уплотнения;
- возможность применения более надёжной и простой системы прямого управления клапанами, работающей только на электрических сигналах, что позволяет отказаться от использования для управления дорогостоящей специальной пневмосистемы;
- меньшие габаритные и массовые показатели по сравнению с другими типами запорных клапанов;
- малое энергопотребление приводов;
- быстрое действие, менее 1 с;
- большой ресурс эксплуатации и высокая надёжность работы клапанов;
- возможность использования электромагнитных клапанов в любых климатических зонах;

– возможность эксплуатации клапанов в широком диапазоне давлений независимо от величины перепада рабочего давления.

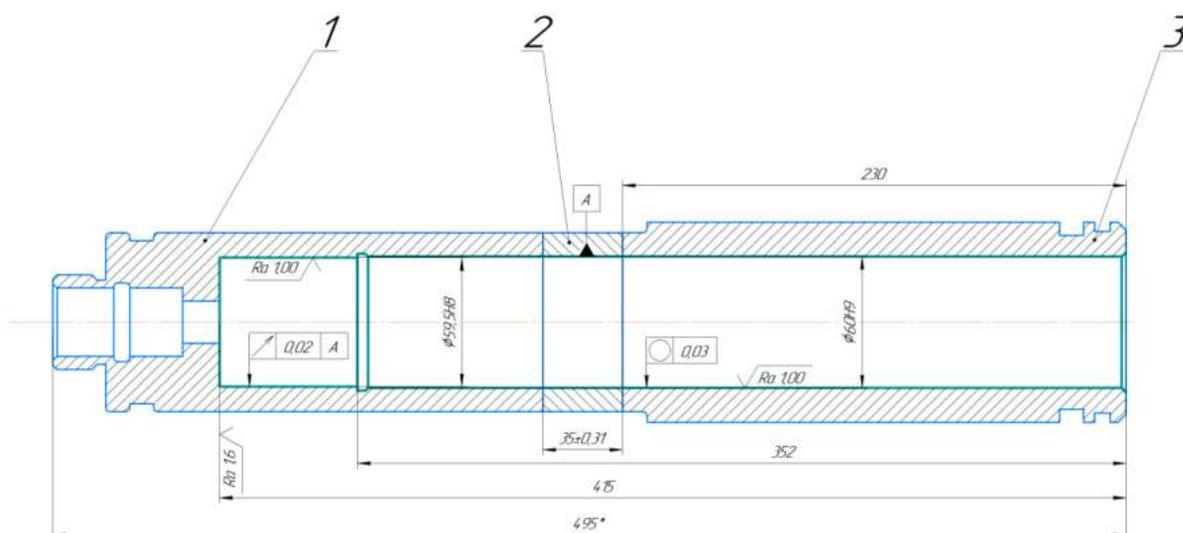


Рисунок 1.2 – Деталь «Труба» запорного электромагнитного клапана

В качестве примера такого узла может послужить деталь «Труба» электромагнитного запорного клапана (Рисунок 1.2), компании ЗАО «Криогенна технология» специализирующаяся на выпуске импортозамещающего оборудования. Деталь «Труба» присвоена классификация детали типа «втулка», состоящей из разнородных материалов, продиктованных конструктивной необходимостью изделия. «Трубу» изготавливают из сварной конструкции, которая включает в себя: 1,3 – нержавеющая сталь 12X18Н10Т ГОСТ 5949-2018; 2 – Сталь 45 (ГОСТ 1050-2013). К ней предъявляются следующие технические требования:

- 1) Сложная внутренняя поверхность трубы обрабатывается по 8-9 квалитетам точности;
- 2) Значения шероховатости $Ra = 1,00$ мкм;
- 3) Изготавливают из сварной конструкции, которая состоит из разнородных сталей;
- 4) Биение оси отверстия $0,02$ мм относительно базы А;
- 5) Допуск круглости $0,02$ мм.

Согласно [92, 15] обобщённо можно выделить две технологии обработки внутренней поверхности деталей класса «втулка», представленные в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Существующие технологии растачивания деталей типа «втулка»

Технология №1	Технология №2
Черновое и чистовое растачивание: – Специальные многорезцовые расточные головки	Черновое и чистовое растачивание: – Расточной резец с твёрдосплавными пластинами
Размерно-чистовая обработка: – Шлифование	Размерно-чистовая обработка: – Шлифование

Черновой и чистовой процесс растачивания отверстия согласно технологиям, представленным в таблице 1.1, осуществляется двумя возможными способами [92]:

– специальной многорезцовой расточной головкой, резцы которой оснащены пластинками твёрдого сплава (Рисунок 1.3);

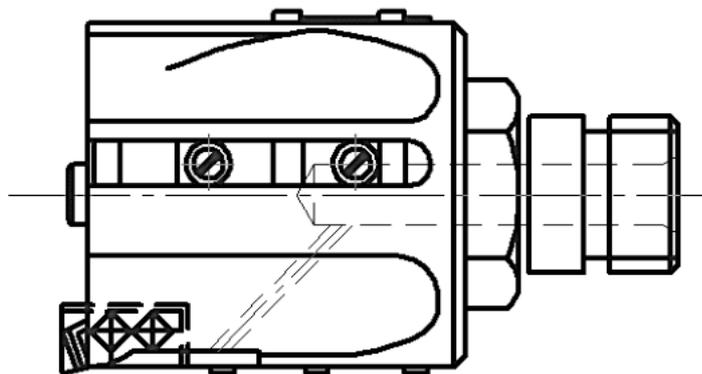
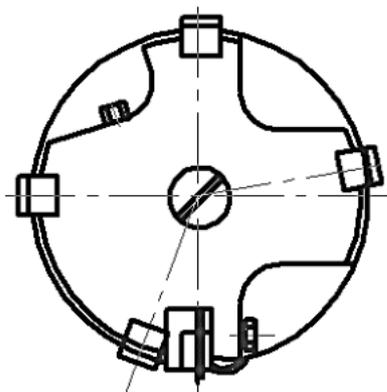


Рисунок 1.3 – Головка для чернового растачивания глубоких отверстий

– расточным резцом с твёрдосплавной пластинкой (Рисунок 1.4)

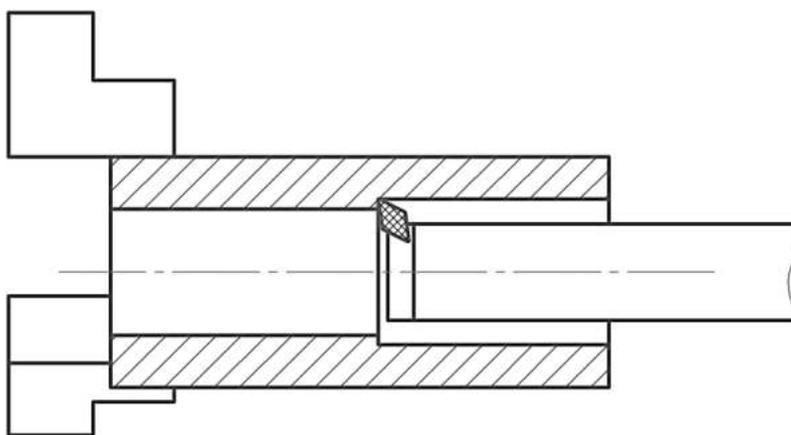


Рисунок 1.4 – Расточной резец с твёрдосплавными пластинками

Однако использование расточных головок сопровождается следующими недостатками:

- дорогостоящий инструмент;
- растачивание диаметров от 70-250 мм;
- недопустима обработка ступенчатых глухих отверстий;
- специализированное оборудование.

На предприятии ООО «НПП «Орион» производилось растачивание детали «Труба» 2-ходового электромагнитного запорного клапана на горизонтальном токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L700MA (Рисунок 1.5, а) с использованием антивибрационного инструмента Silent Tools (Рисунок 1.5, б) от компании Sandvik Coromant с глубиной резания $t_{рез} = 0,4$ мм, оборотами шпинделя $n_{об} = 740$ об/мин и подачей $S_{рез} = 0,1$ мм/об. При растачивании детали «Труба» возник ряд проблем, связанных с разнородностью сварной конструкции. Так при переходе инструмента из одного материала в другой интенсивность колебаний возрастала, что негативно сказывалось на шероховатости внутренней прецизионной поверхности и стабильности механической обработки. Поскольку не было проведено соответствующих исследований по обработке отверстий в сварных деталях, состоящих из разнородных сталей, в первом приближении была выбрана геометрия режущей пластины с учётом обработки по нержавеющей стали по соответствующим ей режимам резания. Но, как показали дальнейшие испытания, на участках из Стали 45 при таких режимах

работы инструмента, возникают участки с высокими значениями шероховатости, что недопустимо относительно предъявляемых требований к детали «Труба». С учётом того, что невозможно резко менять режимы резания на каждом из участков, соответствующих элементам сварной конструкции, проведено разделение технологического процесса на дополнительные переходы (получистовое и чистовое растачивание) для каждого участка. В итоге технологический процесс включает в себя следующие переходы: получистовое растачивание и чистовое растачивание каждого из трёх участков – что негативно сказывается на времени обработки единицы изделия и требует высокой квалификации специалиста, обслуживающего современный токарный станок.



а)



б)

Рисунок 1.5 –Техническое и инструментальное оснащение ООО «НПП «Орион», где: а – токарный обрабатывающий центр Hyundai WIA L700MA; б – расточной антивибрационный инструмент Silent Tools Coroturn SL

При обработке такой разнородной конструкции, не обеспечивается стабильность лезвийной обработки. Возникают силы резания, значительно отличающиеся на каждом из участков, что приводит к потере точности на участке с лучшей обрабатываемостью, за счёт меньшей радиальной составляющей силы резания, чем на первом участке. Растачивание производилось специальной расточной оправкой Silent Tools (Рисунок 1.5, б), в основе которой используется одномассовый демпфер [120], подвешенный на

эластичных кольцах, пространство между корпусом и демпфером заполнено специальной жидкостью. Однако, при нестабильной механической обработке эффективность такого инструмента резко падает. Это связано с тем, что инерционное тело не успевает войти в противофазу с колебаниями конца оправки, тем самым не происходит подавление колебаний, а зачастую является следствием значительного увеличения его интенсивности. Как результат на границе раздела двух разнородных материалов, существует участок с задирами [47, 66, 70, 96].

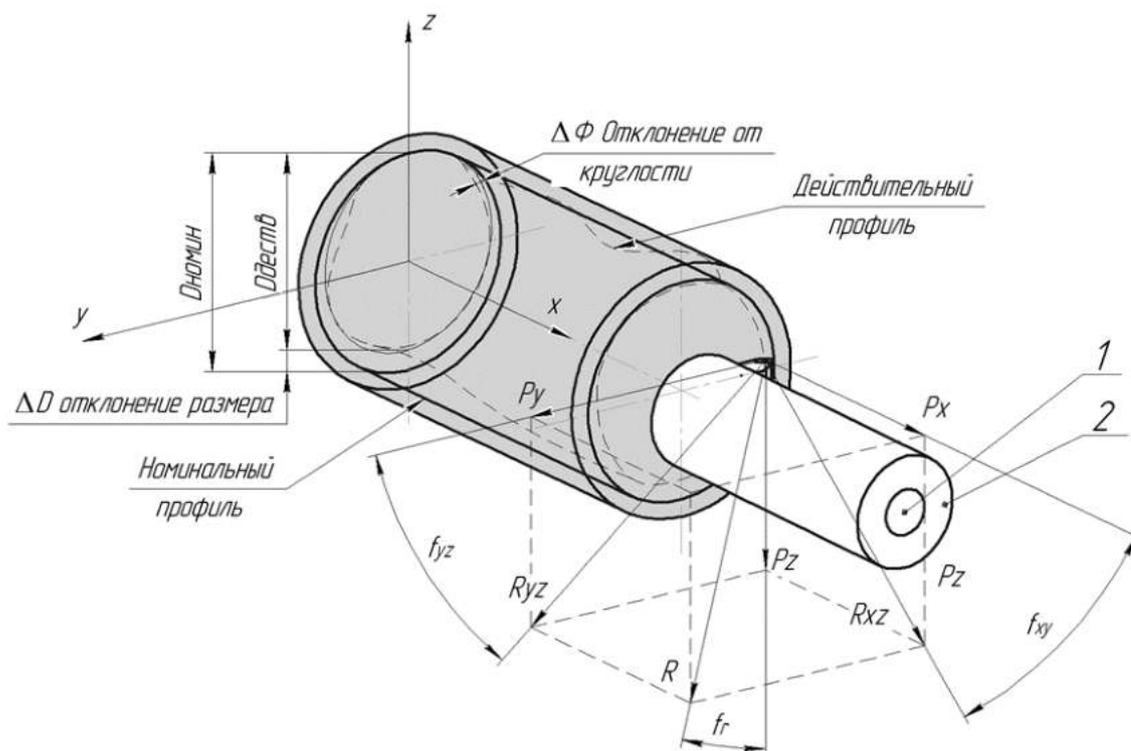


Рисунок 1.6 – Схема сил резания: x, y, z – координаты на станке; P_x – осевая сила; P_y – радиальная сила; P_z – тангенсальная сила; R, R_{xz}, R_{yz} – равнодействующие силы под углом f_r, f_{xz}, f_{yz}

Теоретическим обоснованием вышеизложенного является то, что в процессе лезвийной обработки (Рисунок 1.6) расточной резец испытывает пространственную деформацию в результате действия составляющих сил резания: тангенсальной P_z , радиальной P_y и осевой P_x . Определяющими среди них для статического расчёта являются тангенсальная и радиальная силы резания, по которым определяется изгибающая равнодействующая сил

резания. В силу того, что эти силы максимальные и действуют в плоскости YZ , которая перпендикулярна оси YX , они влияют на параметры точности обрабатываемой детали. Так перемещения в тангенсальном направлении вызывают изменения геометрических параметров резца (передний угол, задний угол и др.), что при обработке детали существенно влияет на качество поверхности и стойкость инструмента. На точность обработки существенно влияет радиальное перемещение, которое отгибая вершину резца от детали, изменяет статическую настройку станка [3, 44, 45, 63].

1.3 Существующие представления о природе возникновения вибраций в технологическом процессе при расточной операции

Одними из первых теоретических исследований динамических процессов при лезвийной обработке металлов являются работы Ф.У. Тейлора и В.Э. Штейнберга, которые были связаны с изучением вынужденных колебаний технологической системы механической обработки, под действием периодически изменяющейся силы резания [102, 110].

Н.А. Дроздов был одним из тех, кто впервые обратил внимание на автоколебательный характер вибраций, возникающих в процессе механической обработки [50, 66, 22].

А.И. Каширин разработал теорию, согласно которой причиной автоколебаний является падающая зависимость «сила – скорость». В основу этой теории была положена статическая характеристика токарной обработки, выражающая зависимость установившейся силы резания от скорости резания [50, 23].

Зависимость составляющих силы резания от изменяющейся во времени толщины среза в условиях автоколебаний была экспериментально установлена А.П. Соколовским, который объясняет неоднозначность зависимости «сила – толщина среза» тем, что при врезании резец снимает нетронутые слои металла, а при отталкивании – уже наклёпанные слои металла, что вызывает мгновенное

увеличение силы резания. Теоретические положения А.П. Соколовского нашли своё подтверждение в экспериментальных исследованиях И.С. Амосова [22, 23].

Явление запаздывания силы резания по отношению к перемещению резца по нормали к обрабатываемой поверхности, а также запаздывания силы трения по отношению к силе резания принято за основу теории автоколебаний, которую разработал М.Е. Эльясберг. Причиной автоколебаний М.Е. Эльясберг называет сам механизм стружкообразования. По мнению автора, в этом состоит явление возникновения опережающей трещины, которая образуется при воздействии на обрабатываемый материал лезвия режущей кромки инструмента. В качестве экспериментального подтверждения этой теории в работе [113, 115] приведены результаты исследования процесса стружкообразования.

Н.И. Ташлицким было выполнено экспериментальное исследование изменений радиальной и тангенциальной составляющих сил резания при изменяющейся ширине контакта стружки с передней поверхностью резца в процессе точения эксцентричных заготовок из стали 40Х. Было установлено, что при механической обработке с увеличивающейся толщиной среза силы резания будут с большой вероятностью меньше, а при обработке с уменьшающейся толщиной среза – много больше, чем должно быть, если бы срезаемая в каждый определённый момент времени толщина среза была постоянной [100].

В работе В.А. Кудинова [52] технологическая система механической обработки (ТСМО) представлена как замкнутая динамическая система с наличием координатных связей. В.А. Кудиновым было введено понятие эквивалентной упругой системы станка, связанной с процессом лезвийной обработки. Исследования особенностей динамической характеристики процесса точения доказывают, что обработка, как правило, сопровождается наличием автоколебаний [103, 119].

Исследования причин возникновения автоколебаний в процессе механической обработки представлены в работах многих авторов. По мнению большинства исследователей, первичные воздействия сил резания выводят из равновесия упругую технологическую систему и приводят к изменению толщины срезаемого слоя. Наличие отставания в изменении силы резания от приращения сечения толщины среза приводит к незатухающим автоколебаниям. При этом возникающие вибрационные следы, вызывающие регенеративные колебания от предыдущих этапов обработки режущим инструментом вносят дополнительную энергию в замкнутую колебательную систему станка [48].

1.4 Способы обеспечения шероховатости поверхности и точности формы посредством снижения вибраций при растачивании

Повышению виброустойчивости элементов технологической системы способствует создание более жёстких узлов станка, приспособлений и инструментов [94]. Технология растачивания с применением режущего инструмента должна обеспечивать высокую скорость и стабильность механической обработки; стабильное формирование и отвод стружки из зоны обработки; достижение заданных показателей точности и шероховатости обработанных поверхностей; универсальное применения для типовых обрабатываемых деталей на разных моделях станков; быстросменность обрабатывающего инструмента при износе или переналадке на другую деталь является важной задачей на пути к автоматизации процесса. Сборный инструмент с механическим креплением режущих пластин в наиболее полной мере отвечает этому требованию [29].

Также существует критерий вылета расточной оправки в зависимости от конструкции обрабатываемого изделия и вида отверстия (глухие и сквозные). Необходимо придерживаться правила растачивать прецизионные глубокие сквозные отверстия с одного установка, так как достаточно сложно совместить

ориентацию баз с предыдущих и последующих операций, что увеличивает трудоёмкость технологического процесса обработки детали. При обработке глухих отверстий возникают ряд сложностей: отвод стружки и при растачивании отверстия, находящегося на некотором расстоянии от торца детали, большой вылет расточной оправки. Для решений перечисленных задач в современном машиностроении существуют технологии с использованием антивибрационного и твёрдосплавного расточного инструмента, позволяющего с высокой точностью (класс точности IT7-9) обрабатывать различные виды отверстий с шероховатостью до $Ra = 1,6$ мкм. Так твёрдосплавные усиленные оправки обладают повышенной изгибной прочностью (в 3 раза эффективнее стальных) [4, 40, 42, 107], причём наилучший вариант закрепления оправки на станке – это через разрезную втулку. Наибольший вылет известного расточного инструмента [120] достигает порядка 10-14 диаметров хвостовика оправки. Такие антивибрационные расточные оправки оснащены специальным механизмом демпфирования вибраций, а для наилучших результатов выполнены из твёрдого сплава. Однако наряду с преимуществами, имеют ряд недостатков. Так технология растачивания с использованием твёрдосплавных оправок позволяет эффективно растачивать отверстия в сварной детали с вылетом инструмента до 5 диаметров оправки, а процесс механической обработки с использованием антивибрационной расточной оправки сопровождается значительным ухудшением шероховатости на границе раздела двух материалов и считается недопустимым при непрерывном растачивании всех элементов сварной детали [41, 70, 75, 97].

Всё мероприятия по виброгашению колебаний применяемые к оснастке и инструменту, согласно проведённому обзору, охватывающему все известные на сегодняшний день методы растачивания отверстий, можно разделить на три обобщённые группы: вибропоглощающие материалы, геометрическая форма инструмента и элементов остатка; пассивное виброгашение и активное виброгашение [5, 21, 41, 46, 60]. Здесь будем рассматривать только те

технологии, которые позволяют растачивать глухие ступенчатые отверстия. Технологии растачивания отверстий методами глубокого сверления борштангами (например отверстия в гидроцилиндрах и стволах орудий глубиной 2-3 метра) в данном исследовании рассматриваться не будут, ввиду применения специальной дорогостоящей оснастки и оборудования, а также ввиду того, что головками борштанг невозможно растачивать различные переходы по диаметру, что накладывает ряд ограничений к применению такой технологии в автоматизированном механическом процессе [32, 92, 104, 118].

1.4.1 Технологическое обеспечение качественных показателей внутренних поверхностей посредством использования вибропоглощающих материалов, геометрических форм инструмента и элементов остатка

Технология растачивания глухих или сквозных отверстий; глубоких или неглубоких накладывает ряд ограничений, связанных с выбором расточного инструмента. Существует множество видов расточных инструментов, специальных материалов и частей оснастки станка с ЧПУ используемых для технологического обеспечения качественных показателей внутренних поверхностей [75, 91]. К непосредственно вибропоглощающим материалам и форме инструмента, а также элементов оснастки можно отнести: специальные вибропоглощающие мастики, различные наполнители для режущего инструмента, применение разнородных материалов в одной конструкции, высокодемпфирующих сплавов и материалов, особой геометрии инструмента. Компанией PLANSEE удалось создать уникальную линейку из современного материала Densimet, в основе которого лежит процесс создания комбинированного материала, полученного в результате прессования и спекания металлов вольфрама-меди-никеля-железа (Рисунок 1.7). Данный композитный материал является дорогостоящим продуктом, из которого производят демпфирующую оснастку и инструмент. Применение технологии

с использованием инструмента из композитного материала значительно увеличивает качество внутренней поверхности, однако высокая цена и способность эффективно гасить вибрации при вылетах до 5 диаметров оправки [122] показала узкую область применения такой технологии [10, 17].

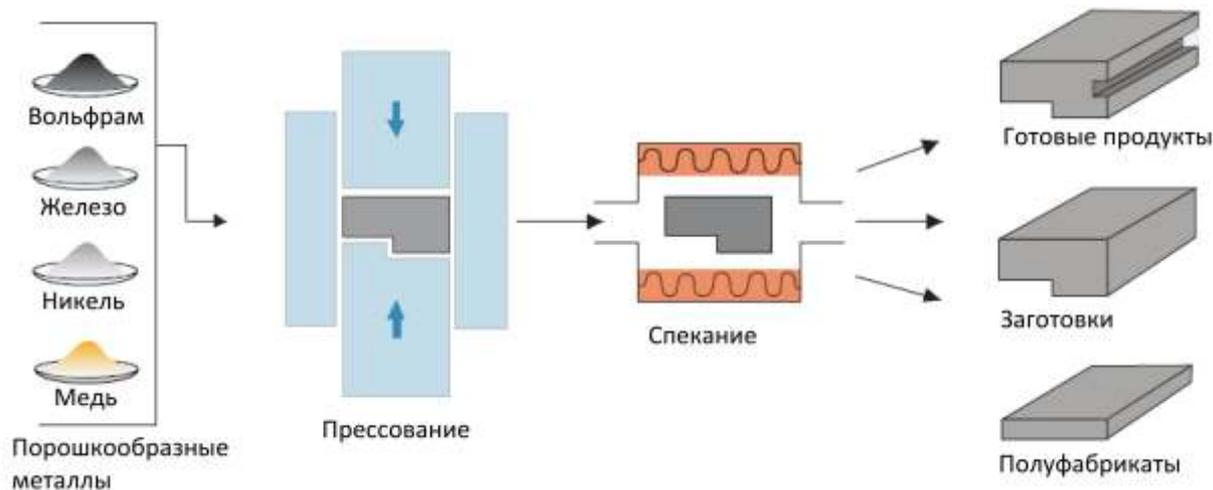


Рисунок 1.7 – Полуфабрикаты, заготовки и готовая продукция, поставляемая из Densimet

Сюда также можно отнести применение в технологическом процессе специальных конструкций расточного инструмента. Технология растачивания отверстий по В.К. Семинскому [11] проходила с использованием специального расточного резца (Рисунок 1.8). Подкрученный стержень инструмента относительно опорной части позволяет сориентировать оси жёсткости технологической системы так, что повышается виброустойчивость инструмента в процессе механической обработки. Однако низкая компенсация упругих перемещений при больших вылетах инструмента не позволяет оптимально проходить технологическому процессу растачивания.

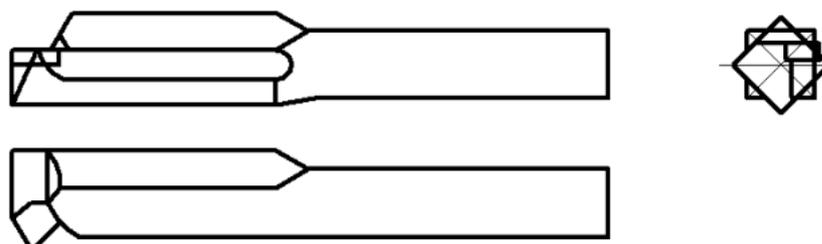


Рисунок 1.8 – Скрученный расточный резец конструкции В. К. Семинского

Перспективным является использование оправок и расточных резцов из материалов с высокими диссипативными свойствами. Добиться весьма

значительного эффекта позволяет комбинирование материалов, обладающих высокой демпфирующей способностью, с мероприятиями, направленными на увеличение жёсткости технологической системы.

Результаты исследований показали эффективность использования опытных инструментов с державками из полимербетона на операциях чистовой и получистовой обработки металлов. Также было установлено значительное (в 1.2 – 1.3 раза) уменьшение значений волнистости и шероховатости обработанной поверхности по сравнению с механической обработкой традиционными резцами при прочих равных условиях. Представленный эффект можно трактовать высокими демпфирующими свойствами полимербетонных державок, которое обуславливает эффективное гашение вибрации в зоне резания в процессе механической обработки [9].

Фирма Mitsubishi разработала, при помощи методов компьютерного моделирования, специальное сечение державок из Dimplebar расточных резцов [121] для обеспечения шероховатости поверхности за счёт повышения жесткостных параметров (Рисунок 1.9).

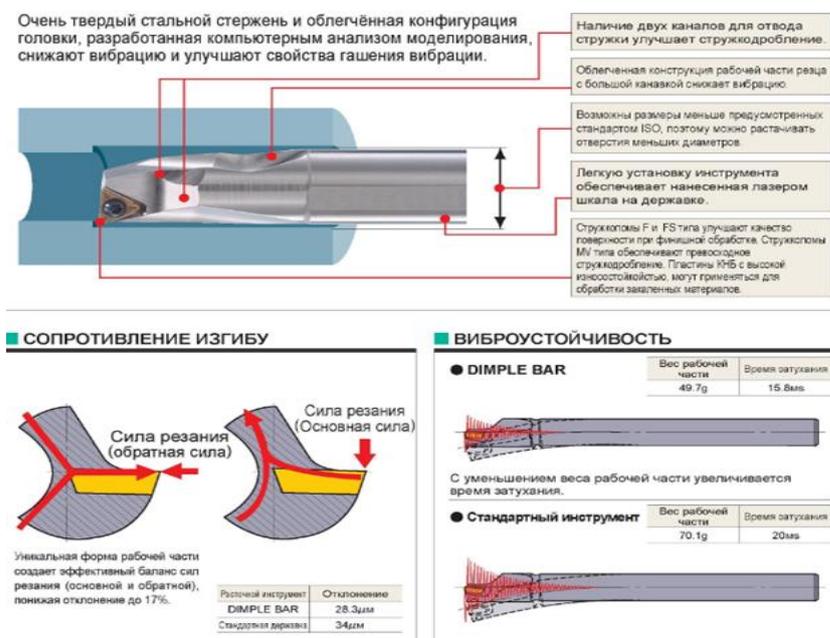


Рисунок 1.9 – Форма сечения державки, характеристики и результаты повышения жёсткости и виброустойчивости при растачивании отверстий

Применение композиционных материалов для изготовления державок режущих инструментов, используемых в технологическом процессе

растачивания, является перспективным решением проблемы повышения качества и точности внутренних поверхностей. Проектирование подобных инструментов требует системного подхода к выбору их конструкции на основе изучения их динамических и прочностных характеристик. Использование державок, которые сочетают в себе композиционные материалы и традиционно применяемые металлы, даёт возможность уменьшить массу инструмента, получая при этом хорошие демпфирующие характеристики.

Однако, несмотря на вышеописанные преимущества, использование композиционных материалов для изготовления инструментов, функционирующих с большим вылетом, затруднено в силу их недостаточной жёсткости.

1.4.2 Технологическое обеспечение качественных показателей внутренних поверхностей посредством использования пассивного виброгашения

Мероприятия, направленные на динамическое виброгашение посредством введения в конструкцию оснастки или инструмента демпфера (одномассового, многомассового), представляющего из себя систему со связями, колеблющуюся в противофазе относительно тела корпуса расточного инструмента, позволяющие решать задачу обеспечения высоких показателей точности и шероховатости различных видов отверстий (глухих, сквозных) в деталях горной, атомной и машиностроительной отрасли России. В наше время технологический процесс растачивания глубоких отверстий зачастую проходит с использованием инструмента с демпфером, который представляет из себя твёрдосплавный хвостовик, сваренный со стальным корпусом, внутри которого на резинках закреплён твёрдосплавный груз в масле. Иногда в качестве хвостовика используют вольфрам, однако это удорожает конструкцию режущего инструмента и использование такого инструмента в технологическом процессе.

Метод растачивания с применением динамических виброгасителей является достаточно универсальным решением по растачиванию прецизионных поверхностей. В отечественных и импортных патентах проводились различные испытания виброгасящих инструментов и оснастки, связанные с подбором оптимальной массы и длины груза, зазорами между элементами демпфера, толщины и жёсткости резиновых колец и др. Рассмотрим детально их технологии и рекомендации по эксплуатации.

Конструкции первых гасителей были разработаны А.П. Соколовским, Д.И. Рыжковым, А.С. Кондратьевым, Л.К. Кучмой. В частности, были сконструированы, изготовлены и испытаны гидравлические виброгасители. Действие гидравлических виброгасителей основано на том, что при протекании жидкости через малое отверстие сопротивление различно при разных скоростях течения жидкости: при небольших скоростях сопротивление мало, при большой скорости протекания жидкости из-за интенсивных вибраций, толчков это сопротивление возрастает. Гидравлический виброгаситель принципиально отличается от люнета, так как он гасит вибрации, не увеличивая жёсткость технологической системы. Но ввиду того, что гидравлические виброгасители имеют сложные конструкции и для их использования требуется использование сложной гидравлической системы, вызывает определённые трудности при их внедрении в производство [11, 9].

Отечественными учёными ещё в прошлом веке были предложены технологии механической обработки с использованием пассивных виброгасителей различных конструкций, которые получили наибольшее распространение. Среди них можно выделить многомассовые демпферы, рассеивание энергии колебаний в которых осуществляется за счёт сил трения и соударения отдельных частей динамического гасителя, принцип действия которого основан на использовании явлений антирезонанса. Многомассовые демпферы могут использоваться для демпфирования как крутильных, так и изгибных колебаний. Представленные демпферы представляют из себя комплект инерционных дисков, расположенных в корпусе оправки. При

колебании оправки во время технологического процесса диски перемещаются в поперечном направлении и, соударяясь со стенками корпуса, рассеивают энергию колебаний. За счёт этого меняется амплитудно-частотная характеристика, и резонансные пики [73, 89]. Недостатком многомассовых демпферов являются высокие требования к внутренним элементам демпфера и, следовательно, высокая вероятность склонения инструмента к вибрациям, за счёт тяжести периферии оправки, показывают слабую эффективность гашения вибраций при больших вылетах инструмента и универсальность.

В отечественной литературе можно встретить использование в технологическом процессе расточной борштанги с виброгасителем ударного действия (Рисунке 1.10).

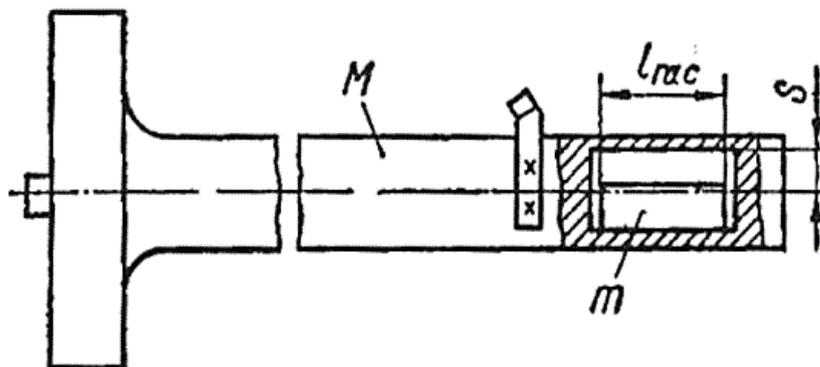


Рисунок 1.10 – Расточная оправка с ударным виброгасителем

На конце борштанги в осевое отверстие помещён цилиндрический груз с зазором, который определяют по расчётному значению амплитуды колебаний борштанги. Массу груза m определяют, исходя из массы оправки M и расчёта динамических параметров упругой системы. Однако высокая инерционность процесса демпфирования не позволяет эффективно гасить вибрации при растачивании отверстий в деталях с конструктивными элементами, создающими прерывистость резания, либо в деталях, сваренных из разнородных материалов [11].

Все известные устройства гасителей ударного действия принципиально довольно схожи и представляют собой дополнительную массу в виде цилиндра, кольца, встраиваемых с некоторым зазором в подверженную

колебаниям или способную колебаться систему. Ударные виброгасители по простоте конструкции, надёжности работы, удобству в эксплуатации превосходят многие другие известные устройства для гашения вибраций рассеиванием энергии колебаний. Известен виброгаситель конструкции Д.И. Рыжкова (Рисунок 1.11).

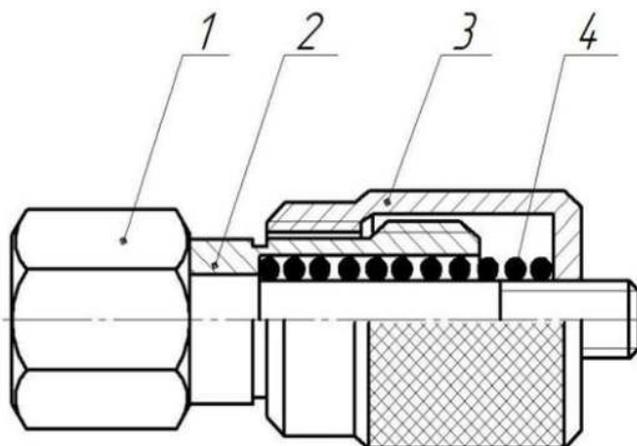


Рисунок 1.11 – Конструкция виброгасителя Д.И. Рыжкова

Виброгаситель Д.И. Рыжкова, установленный в корпусе расточной оправки, способен гасить вибрации, как низкой, так и высокой частот. Этот эффект достигается за счёт колебания крышки демпфера с запаздыванием по фазе, близким по отношению к колеблющейся периферии оправки. При обработке внутренних поверхностей виброгаситель устанавливается в резьбовое отверстие резца или оправки (Рисунок 1.12). Большие габариты конструкции демпфера и тонкая настройка виброгасящего устройства не нашли широкого применения в технологическом процессе растачивания отверстий до 100 мм. [79]

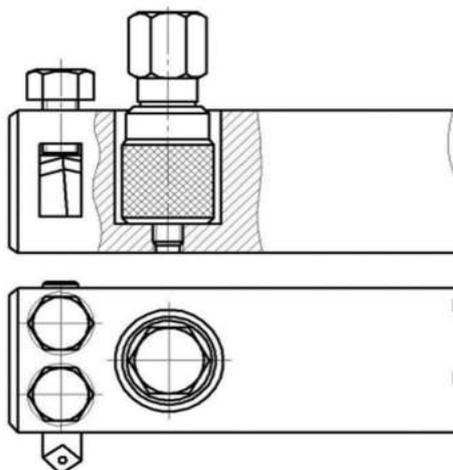


Рисунок 1.12 – Оправка с установленным виброгасителем Д.И. Рыжкова №2

Известны конструкции виброгасителей А.С. Кондратьева, в которых в качестве демпфирующего элемента используется резиновая прокладка или пружина. На Рисунке 1.13 представлены виброгасители А.С. Кондратьева, в которых между шестигранными гайками 1, связанными со штоком 2, установлена пружина 3.

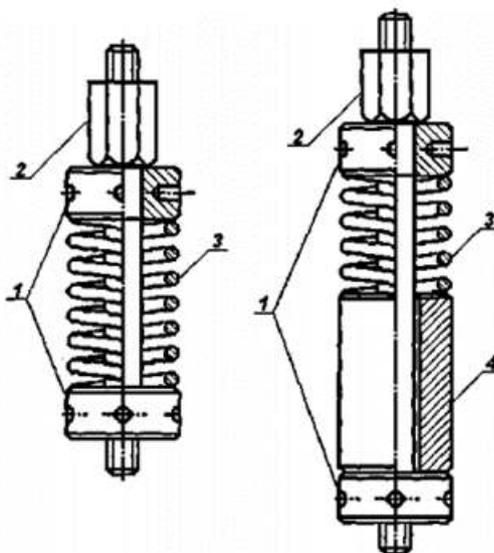


Рисунок 1.13 – Конструкция виброгасителя Кондратьева А.С.

В одном из виброгасителей А.С. Кондратьева установлен дополнительно груз 4 между пружиной и гайками [11]. Применение данной конструкции демпфера в расточной оправке сопровождается теми же недостатками, что и виброгасители Д.И. Рыжкова.

Пружинный сборный резец-виброгаситель Д.И. Рыжкова, который позволяет регулировать его динамические параметры (Рисунок 1.14), позволяет гасить вибрации, возникающие при тонкой лезвийной обработке отверстий. Установленное в державке резца устройство, имеющее перемещаемую инертную массу, передвигаемое дальше или ближе к головке позволяет регулировать частоту и амплитуду колебаний вершины резца. На Рисунке 1.14 показана расточная оправка 1 с закреплённым резцом 4 со стержневым виброгасителем 2 с регулировкой натяга в резьбовом соединении при помощи пружины 3 [78]. Так как виброгаситель не жёстко связан с расточной оправкой, он является инертной массой в теле оправки, которая способна гасить вибрации, но имеет большое запаздывание при гашении вибраций, возникающих при прерывистой механической обработке, в частности при растачивании отверстий в сваренных из разнородных сталей деталей.

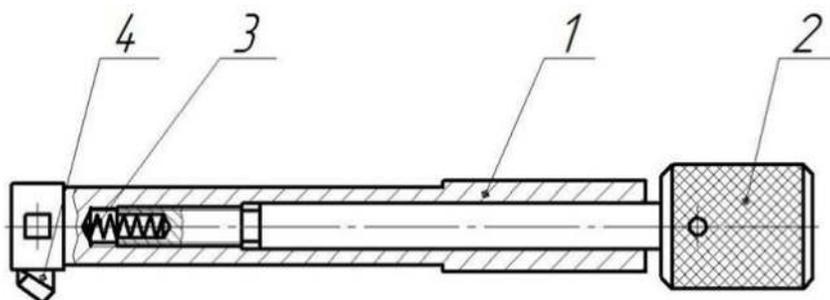


Рисунок 1.14 – Оправка со стержневым виброгасителем

Компания Sandvik Coromant предлагает своим клиентам осуществлять технологический процесс растачивания различных видов отверстий посредством использования специально разработанной для этой цели линейки режущих инструментов модульного типа, совместимые с антивибрационными оправками Silent Tools, и эффективно демпфирующие вибрации при помощи инертных масс, находящихся в специальной вязкой жидкости (Рисунок 1.15) [120].

По исследованиям фирмы Sandvik Coromant, при отношении вылета к диаметру сечения резца $L/d < 4$ возможно применение стальных державок, при

$L/d = 4-6$ рекомендуется применять твёрдосплавные державки, которые имеют больший модуль упругости. При увеличении относительного вылета до более высоких значений ($L/d = 6 - 14$) предлагается использовать специальные антивибрационные оправки [120].

Проведённые опыты компании «Кюосега» с использованием многомассовых виброгасящих систем показали свою эффективность демпфирования вибраций при растачивании отверстий. Но высокие требования к горизонтальному ориентированию инструмента и заклинивание элементов демпфера снижает подвижность грузов, ведёт к ряду проблем, и необходимости тонкой настройки расточного инструмента.



Рисунок 1.15 – Расточная оправка Silent Tools компании Sandvik Coromant

Как уже было отмечено, при растачивании отверстий одной из главных причин, вызывающих вибрации и снижающих качественные показатели поверхности, является низкая жёсткость консольного инструмента. Для консольного растачивания отверстий М.А. Ларионовым было разработано устройство, принципиальная схема которого изображена на Рисунке 1.16 [56].

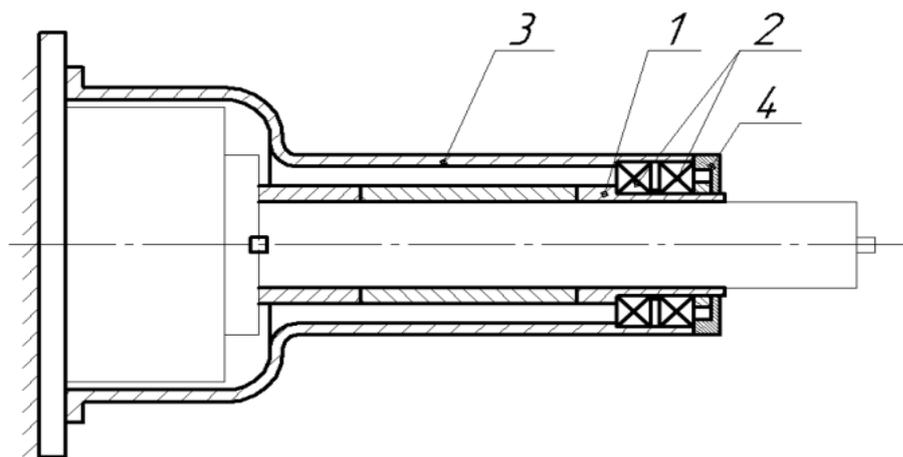


Рисунок 1.16 – Борштанга для растачивания отверстия М.А. Ларионова

В этом устройстве внутренняя втулка 1, состоящая из трёх частей, устанавливается в корпусе 3 с подшипниками 2 и крышкой 4. Подшипники создают шпинделю дополнительную подвижную опору, уменьшая его консольную часть. Элементы втулки соединены между собой при помощи специальных зажимов и винтов. Чтобы обеспечить требуемую точность, можно изменить режим механической обработки: процесс растачивания производить за несколько проходов. Однако это значительно снижает производительность труда. Сократить основное технологическое время и повысить производительность обработки можно, применив многорезцовую обработку [56].

Известна технология механической обработки отверстий с помощью расточной оправки, которая позволяет обрабатывать отверстие одновременно двумя резцами за один проход (Рисунок 1.17) [88]. Оправка состоит из втулки 1 и расположенного внутри неё стержня 2. Первый резец крепится на втулке, второй – на стержне. Между втулкой и стержнем имеется зазор. Прогиб оправки под действием силы резания, действующей на первый резец, не влияет на прогиб стержня 2, так что вибрации трубы и стержня не влияют друг на друга.

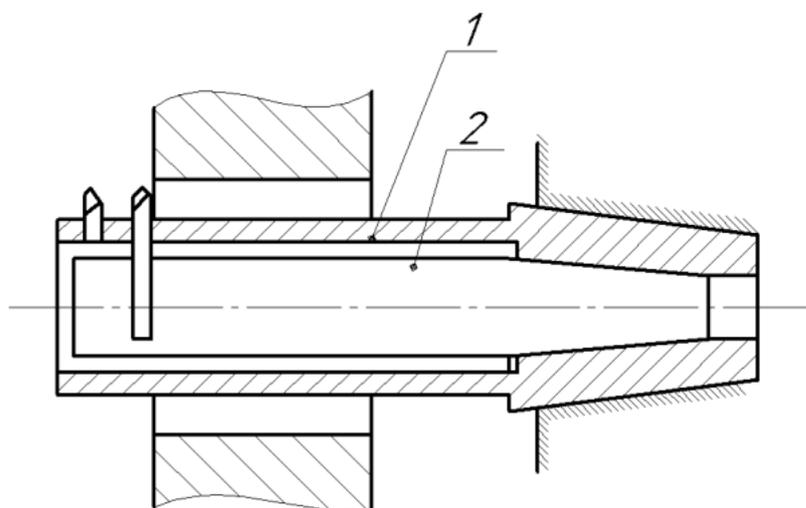


Рисунок 1.17 – Специальная расточная оправка

Рассмотренная оправка имеет существенный недостаток, заключающийся в трудоёмкости и сложности регулировки положения резца при переходе к обработке отверстий других диаметров, в особенности точных диаметров.

1.4.3 Технологическое обеспечение качественных показателей внутренних поверхностей посредством использования активного динамического виброгашения

Технологически обеспечить заданную шероховатость и точность различных видов отверстий можно при помощи специальных средств активного динамического виброгашения. Демпфирование вибраций при активном виброгашении осуществляется при помощи систем автоматического управления процессом механической обработки [82]. В работе [58] предложена система автоматического управления с адаптивной кинематической связью, которая основана на применении датчиков, измеряющих относительное смещение инструмента и заготовки в поперечном сечении. При разработке систем автоматического управления для снижения уровня вибраций возникают проблемы, связанные с необходимостью разработки специальных исполнительных механизмов, осуществляющих малые перемещения с высокой точностью и быстродействием.

С.Н. Григорьевым была описана система компенсации упругих смещений вершины резца в процессе механической обработки [30]. В роли привода исполнительного устройства был применён пьезоэлектрический электромеханический преобразователь. Помимо систем автоматического регулирования, где фиксирование смещения вершины резца и компенсация этого смещения выполняется в процессе механической обработки, существуют системы, контролирующие траекторию движения вершины резца.

В этой системе значение припуска по сечению отверстия, либо записывается в блок памяти перед обработкой, либо в процессе обработки формируется некое искажение траектории движения инструмента с учётом характеристик процесса механической обработки и технологической системы. Приемлемая для промышленного использования система автоматического управления должна быть автономной и устанавливаться на станке без его модернизации, иметь относительно простую конструкцию и высокую эффективность. Все это приводит ко многим ограничениям для применения систем автоматизированного управления в производственных условиях [83].

1.5 Выводы по первой главе

Проведённый анализ показал, что довольно надёжно себя зарекомендовали технологии механической обработки с использованием системы динамического виброгашения Sandvik, Dorian, Seco, KENNAMETAL.

Обзор представленных данных доказал, что в большинстве случаев применяются два основных направления исследований по снижению уровня вибраций при обработке растачиванием: повышение жёсткости звеньев, входящих в технологическую систему, и увеличение демпфирующих свойств элементов системы. При этом методы снижения уровня колебаний инструмента путём создания виброустойчивых систем исследованы недостаточно.

Цель работы заключается в разработке научно обоснованного технологического процесса растачивания внутренних прецизионных поверхностей деталей типа «втулка», сваренных из разнородных сталей, обеспечивающего заданные показатели шероховатости поверхности и точностных параметров с использованием нового инструментального оснащения, обладающего высокими демпфирующими свойствами.

Для достижения цели необходимо:

– провести анализ, а также обобщить экспериментально-теоретические данные, описанные в литературных источниках и связанные с темой исследования;

– разработать способ технологического обеспечения геометрических параметров точности внутренних прецизионных поверхностей при растачивании отверстий в деталях, состоящих из разнородных сталей, посредством использования специального инструмента, обладающего диссипативными свойствами;

– разработать расточную оправку, находящуюся в определённом фиксированном напряжённо-деформированном состоянии для обеспечения подавления возмущений, возникающих в процессе растачивания разнородных сталей;

– установить влияние степени напряжённо-деформированного состояния расточной оправки на динамические параметры, влияющие на технологическое обеспечение шероховатости прецизионных поверхностей;

– создать математическую модель технологической системы при растачивании внутренних прецизионных поверхностей деталей, состоящих из разнородных сталей, с учётом предварительного напряжённо-деформированного состояния расточной оправки, обладающей диссипативными свойствами;

– определить границы области устойчивости между стандартной и предлагаемой расточной оправкой в напряжённо-деформированном состоянии при технологическом обеспечении параметров точности и

шероховатости внутренних прецизионных поверхностей деталей, сваренных из разнородных сталей;

– провести экспериментальные исследования влияния степени напряжённо-деформированного состояния расточной оправки, с учётом границы области устойчивости, на шероховатость внутренних прецизионных поверхностей;

– предложить практические рекомендации по настройке инструментального оснащения и технологию, которое снизит влияние колебаний подсистемы «инструмент» на качество и точность изготовления прецизионных поверхностей из разнородных сталей.

ГЛАВА 2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ТОЧНОСТИ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКЕ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСТОЧНОЙ ОПРАВКИ В НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОМ СОСТОЯНИИ

На сегодняшний день колебательный процесс является объектом исследований во многих областях современной науки. Такой интерес к колебательному процессу объясняется существованием в природе широкого многообразия механизмов его возбуждения. Наглядным примером могут служить динамические колебания ротора и лопаток турбины, которые вызваны неуравновешенностью ротора в результате нарушения окружной симметрии сечения [1]. Вышеприведённый пример не является единственным случаем возникновения колебательного процесса в технике.

Исследования колебательного процесса осуществляются и в области технологии машиностроения. Это вызвано тем, что все без исключения этапы производства сопровождаются вибрациями различной природы, что оказывает непосредственное негативное влияние на качество выпускаемой продукции. Особое внимание в технологии машиностроения уделяется колебательным процессам, возникающим при изготовлении изделий на станках с ЧПУ путём механической обработки.

Как правило, колебательный процесс при механической обработке, а также в подвижных и плотно затянутых узлах станка с ЧПУ, принято разделять на четыре достаточно самостоятельных категории по характеру возбуждения: свободные колебания; вынужденные колебания; параметрические колебания (гармонические); автоколебания (самовозбуждающиеся) [52].

За относительно небольшое время сформировалось большое количество гипотез со стороны отечественных и иностранных учёных, о возникновении тех или иных видов колебаний в технологической системе механической обработки (ТСМО). Каждая из вышеперечисленных категорий в большей или

меньшей степени влияют на макро- и микрогеометрические параметры изготавливаемого изделия. Однако наибольшее воздействие на макро- и микрогеометрические параметры оказывает автоколебательный процесс.

Из существующих теорий, адекватно описывающих причины возбуждения автоколебаний и их поддержание в замкнутой системе, является гипотеза, изложенная М.Е. Эльясбергом. В соответствии с данной гипотезой, физическая природа возникновения автоколебательного процесса кроется в запаздывании сил резания и трения [113, 115]. На стадии механической обработки, при упругопластической деформации заготовки режущим инструментом, происходит приращение нормального контура $x \rightarrow \Delta x$, что вызывает изменение силы резания P на величину ΔP в направлении касательного контура y , расположенного к поверхности. В результате приращения силы резания ΔP , возникают запаздывания силы трения стружки по резцу $Q \rightarrow \Delta Q$, поддерживая, таким образом, автоколебательный процесс в замкнутой системе и переводя его в режим неустойчивого состояния с предельным циклом [114]. По этой причине происходит ухудшение, как шероховатости поверхности, так и точностных показателей изделия, изготовленного на металлообрабатывающих станках с ЧПУ.

Решить данную проблему позволил повышение демпфирующей способности расточной оправки. На основании чего предлагается в корпус расточной оправки интегрировать разжимной конус, который посредством затягивания позволит изменять напряжено-деформированное состояние. Переход из нейтрального состояния в напряженное состояние позволит изменять в широком диапазоне динамические параметры расточной оправки. Такая конструкция расточной оправки позволит увеличить демпфирующие свойства и жёсткость, подавляя, таким образом, амплитуду автоколебательный процесс при растачивании разнородной сварной конструкции.

В связи чем, разработка расточной оправки с регулируемым напряжённо-деформированным состоянием состоит из следующих последовательных этапов:

- обоснование выбора материала для корпуса антивибрационной расточной оправки;
- обоснование выбора конструкционного демпфирования для антивибрационной расточной оправки;
- технология изготовления антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом;
- определение динамических параметров антивибрационной расточной оправки при различной степени затяжки разжимного конуса в диапазоне от 4 до 10 вылетов;
- определение собственных мод антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом;
- определение амплитудно-частотных характеристик расточной оправки с разжимным конусом;
- предварительные производственные испытания антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом.

2.1 Обоснование выбора материала для корпуса антивибрационной расточной оправки

Основной группой материалов для изготовления державок расточного инструмента являются конструкционные стали марок 45, 50 (ГОСТ 1050-2013 или ГОСТ 1051-73), стали 40Х, 45Х (ГОСТ 4543-2016), инструментальные стали У8, У10 (ГОСТ 1435-99) [82] с различными сечениями: круглым, квадратным, прямоугольным. Выбор тех или иных материалов и видов сечения, определяется требованиями, предъявляемыми к инструментам. Во-первых, державки должны обладать высокой прочностью, так как в процессе резания инструмент воспринимает большие знакопеременные нагрузки. Во-

вторых, державки должны иметь высокую демпфирующую способность, для подавления автоколебательного процесса при механической обработке.

Высокая прочность державки обеспечивается за счёт предварительной термической обработки, а повышение демпфирующей способности посредством выбора материала с лучшими показателями диссипаций энергии за период колебания. Однако, как показывает практика, подбор материала является сложной задачей, так как рассеивание энергии зависит от множества факторов и подобрать нужные показатели является затруднительным [82].

Под демпфирующей способностью принято понимать поглощение энергии в результате необратимых процессов при циклическом деформировании. Как известно, рассеивание энергии в материале в значительной степени нелинейно зависит от: амплитуды и длительности воздействия циклических напряжений; от вида напряжённого состояния, обусловливаемого видом колебаний (продольные, поперечные, крутильные); от структуры материала, обусловленной, в частности, термической обработкой; от вида сечения [52].

Для каждого агрегатного состояния материала существует свой механизм рассеивания энергии. При этом механизм рассеивания энергии в материалах весьма сложный и не до конца изученный физический процесс. В настоящее время имеется ряд гипотез, описывающих источник рассеивания энергии в материале (Рисунок 2.1). Рассмотрим существующие источники рассеивания более подробно.

Первой и наиболее распространённой гипотезой является предположение о рассеивании энергии, которое обусловлено пластическим деформированием микрообъёмов материала. Объясняется данная теория тем, что под действием внутренних напряжений в реальных поликристаллических материалах возникают локальные пластические деформации микрообъёмов материала. Такие микропластические деформации приводят к необратимым процессам, обуславливающим потери энергии в материале при его циклическом деформировании. С точки зрения дислокационной теории

внутреннего трения, этот вид рассеивания энергии связан с движением дислокаций [82, 105].

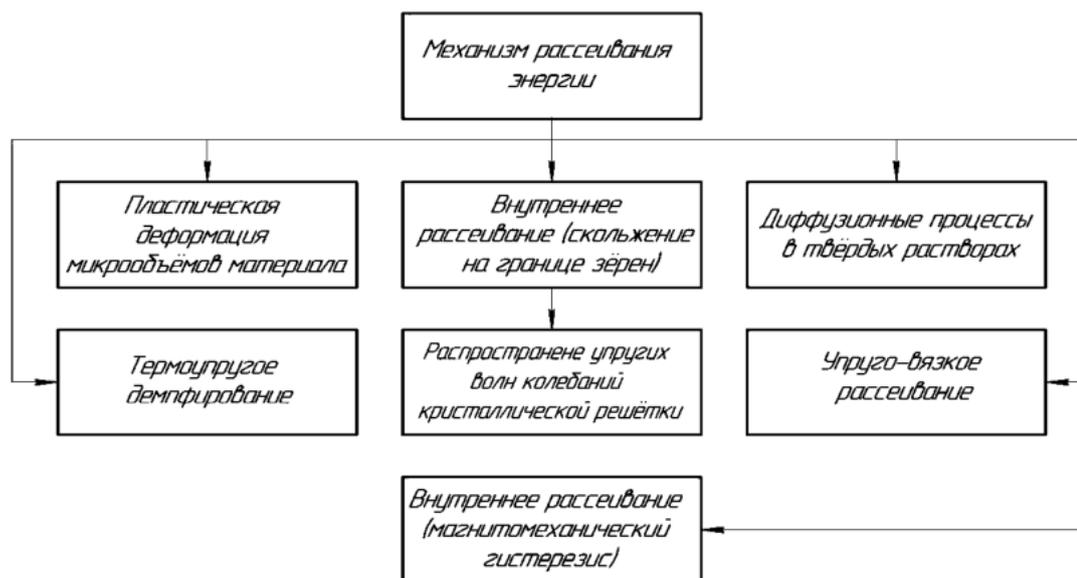


Рисунок 2.1 – Механизм рассеивания энергии в материале

Механизм демпфирования в поликристаллических материалах также объясняется внутренним рассеиванием энергии, что обусловливается скольжением на границе зёрен. Обнаруживается такого рода рассеивание только в поликристаллических материалах или в достаточно чистых металлах, в которых отсутствует поглощение энергии, обусловленное диффузией. Однако, невзирая на многочисленные исследования данного вида рассеивания энергии, до сих пор нет достаточно надёжных теоретических версий, подтверждаемых экспериментальными данными [108].

На микроуровне в поликристаллических металлах рассеивание энергии, можно объяснить распространением упругих волн колебаний кристаллической решётки, которая происходит при частотах порядка одного мегагерц [72].

Ещё одним видом рассеивания энергии в материале является термоупругое демпфирование. Природа данного процесса кроется в тепловых потоках микро- и макро-характера, которые возникают посредством того, что различные объёмы материала испытывают напряжения различной интенсивности, то есть имеют градиент температур [49].

В твёрдых растворах характерен исключительно диффузионный механизм рассеивания энергии, который возникает по причине того, что циклическое деформирование поддерживает диффузионный процесс, а в пластмассах и неметаллических материалах наблюдается упруго-вязкое рассеивание энергии, аналогичное потерям энергии при колебаниях твёрдых тел в вязкой жидкости.

Ферромагнитным материалам присуще внутреннее рассеивание энергии, обуславливающееся макро- и микровихревыми токами, и магнитомеханическим гистерезисом.

Как можно видеть, природа рассеивания энергии в материалах весьма разнообразна и имеет сложный физический процесс. Поэтому из этого многообразия стоит выделить те механизмы рассеивания, которые относятся к поликристаллическим материалам, используемых для изготовления режущего инструмента. В связи с чем основным механизмом рассеивания энергии можно считать: скольжение на границе зёрен; пластические деформации микрообъёмов материала; внутренние рассеивания [55].

В целях последующего выбора материала для разработки антивибрационной расточной оправки, необходимо оценить демпфирующую способность каждой стали. На основании чего проведён анализ наиболее распространённых материалов, используемых для изготовления державок расточного инструмента: Сталь 45 (ГОСТ 1050-2013), Сталь 40Х (ГОСТ 4543-2016) и Сталь У10 (ГОСТ 1435-99)[112].

Сталь 45 (ГОСТ 1050-2013) – конструкционная углеродистая сталь. В её химическом составе находится: марганец (от 0,5 до 0,8%); углерод (от 0,42 до 0,56%); никель (не более 0,3%); хром (до 0,3%); кремний (от 0,17 до 0,39%); фосфор (не более 0,045%); сера (до 0,045%).

Механические свойства: модуль упругости – $E = 2,03 \cdot 10^5$ МПа; модуль сдвига – $G = 0,8 \cdot 10^5$ МПа; предел прочности – $\sigma_B = 600 \div 700$ МПа; предел текучести – $\sigma_T = 320 \div 380$ МПа [106].

На первом этапе устанавливалась зависимость логарифмического декремента колебаний от напряжений при изгибных колебаниях Стали 45, в трёх состояниях (Рисунок 2.2): а – после нормализации; б – после нагрева до 840 °С, выдержки в течение 1 ч, заковки в масле, отпуска от 640 °С с выдержкой в течение 1 ч; в – после нагрева до 830 °С, заковки в воду, отпуска от 620 °С на воздухе. Частота колебаний образцов: 10 – 100 Гц, напряжение 50 – 416 МПа. Результаты исследований приведены в таблице 2.1 [82].

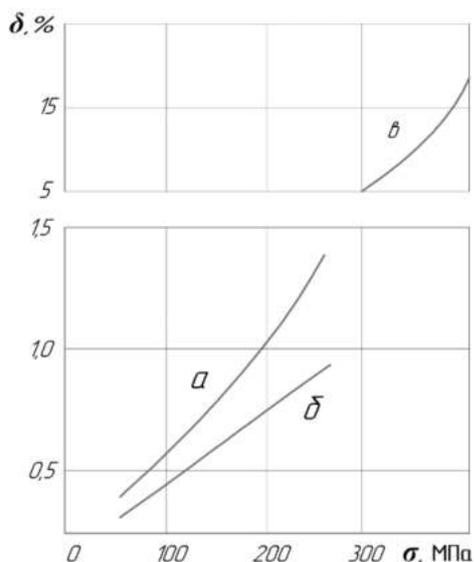


Рисунок 2.2 – Зависимости логарифмического декремента колебаний от напряжений для Стали 45 при изгибных колебаниях

Таблица 2.1 – Изгибные колебания стального образца марки 45

Состояние материала *а* (Рисунок 2.2)

σ , МПа	50	98	147	196	245
δ , % +20°С	0,4	0,56	0,8	1	1,33
δ , % -60°С	0,3	0,46	0,6	0,75	0,9

Состояние материала *в* (Рисунок 2.2)

σ , МПа	318	343	367	392	416
δ , %	7	10	13	18	24

На втором этапе устанавливалась зависимость напряжения для Стали 45 при колебаниях чистого изгиба от логарифмического декремента колебаний (Рисунок 2.3). Частота колебаний образцов: 0 – 100 Гц, напряжение 20 – 294 МПа. Результаты исследований приведены в таблице 2.2.

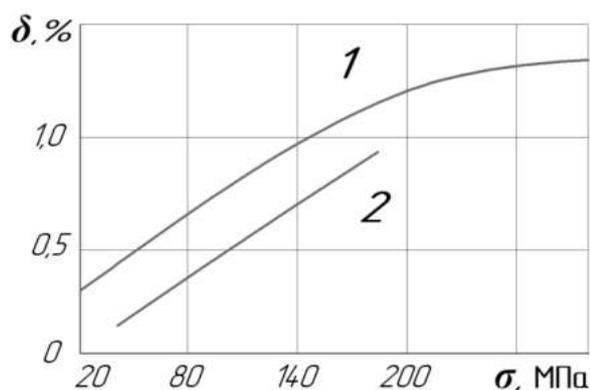


Рисунок 2.3 – Зависимости напряжения для Стали 45 при колебаниях чистого изгиба после нормализации от логарифмического декремента колебаний: 1 – призматический образец; 2 – цилиндрический образец

Таблица 2.2 – Колебания чистого изгиба стального образца марки 45

Номер образца	σ , МПа	20	98	157	176	196	294
1	δ , % – п.	0,3	0,63-0,9	1,05	-	1,23	1,35
2	δ , % – ц.	-	0,46	0,79	0,89	-	-

Третий этап предназначался для определения влияния зависимости логарифмического декремента колебаний от напряжений для Стали 45 при крутильных колебаниях (Рисунок 2.4). Частота колебаний образцов: 150 – 320 Гц, напряжение 10 – 100 МПа. Результаты исследований приведены в таблице 2.3.

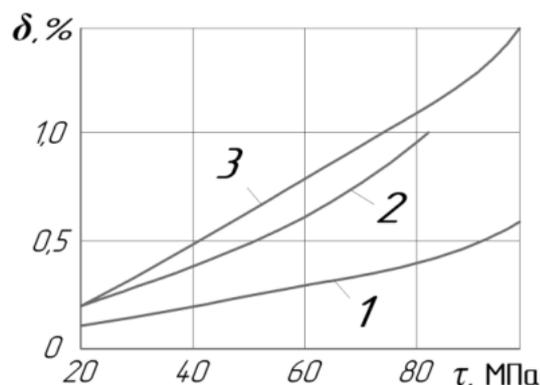


Рисунок 2.4 – Зависимости напряжения для Стали 45 при крутильных колебаниях от логарифмического декремента: 1 – цилиндрический образец после нормализации; 2 – трубчатый образец после нормализации; 3 – трубчатый образец после закалки и отпуска от 640 °С

Таблица 2.3 – Крутильные колебания стального образца марки 45

Состояние материала 1 и 3 (Рисунок 2.4)

τ , МПа	20	40	60	80	100
δ , % с.	0,12	0,2	0,3	0,4	0,6
δ , % т.	0,21	0,4	0,63	0,95	-

Состояние материала 2 (Рисунок 2.4)

τ , МПа	10	20	40	60	80	100
δ , %	0,1	0,2	0,5	0,8	1,12	1,48

Сталь 40Х (ГОСТ 4543-2016) – конструкционная легированная сталь. В её составе находится: хром (от 0,8 до 1,0%); марганец (от 0,5 до 0,8%); углерод (от 0,35 до 0,45%); никель (не более 0,4%); кремний (от 0,17 до 0,37%); медь (не более 0,3%); сера (до 0,04%); фосфор (не более 0,04%).

Механические свойства: модуль упругости – $E = 2,175 \cdot 10^5$ МПа; модуль сдвига – $G = 0,85 \cdot 10^5$ МПа; предел прочности – $\sigma_B = 847,5$ МПа; предел текучести – $\sigma_T = 515$ МПа.

Для стали 40Х устанавливалась зависимость логарифмического декремента колебаний от напряжений при крутильных колебаниях (Рисунок 2.5) [82].

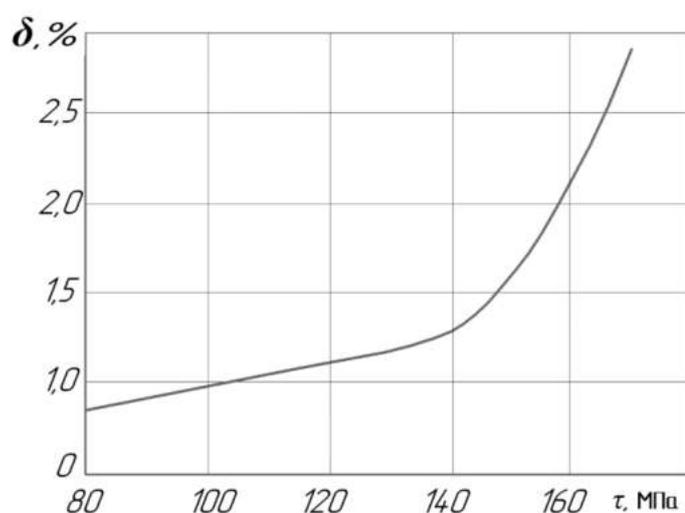


Рисунок 2.5 – Зависимость напряжений для Стали 40Х при крутильных колебаниях цилиндрических образцов от логарифмического декремента колебаний

Состояние материала следующее – после нагрева до 800 °С, затем выдержки в течении 1 ч и охлаждение на воздухе (нормализация). Частота колебаний образцов: 150 Гц, напряжение 80 – 170 МПа. Результаты исследований приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Крутильные колебания стального образца марки 40Х

τ , МПа	80	100	120	140	160	170
δ , %	0,86	1	1,13	1,28	2,07	2,85

Сталь У10 (ГОСТ 1435-99) – это инструментальная углеродистая сталь. В её составе находится: углерод (от 0,95 до 1,04%); марганец (от 0,15 до 0,3%); кремний (от 0,15 до 0,3%); хром (до 0,15%) [31].

Механические свойства: модуль сдвига – $G = 0,8 \cdot 10^5$ МПа.

При испытании инструментальной стали У10 устанавливалась

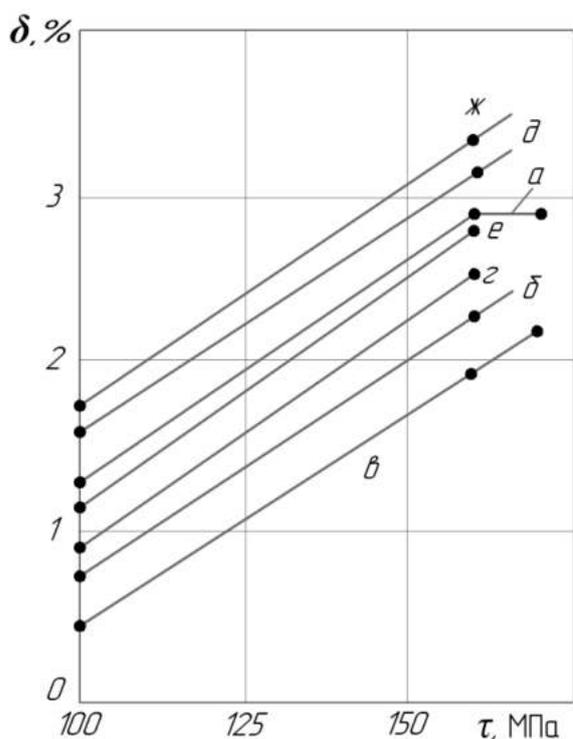


Рисунок 2.6 – Зависимости логарифмического декремента колебаний от напряжений для стали У10 при крутильных колебаниях

зависимость логарифмического декремента затухания от крутильных колебаний при различных режимах термической обработки (Рисунок 2.6): а – после закалки в воду от 800 °С; б – после операции отпуска от 100 °С; в – после операции отпуска от 200 °С; г – после операции отпуска от 300 °С; д – после операции отпуска от 400 °С; е – после операции отпуска от 500 °С; ж – после отпуска от 600 °С. Частота колебаний образцов при измерении составила: 150 Гц, напряжение 100 – 170 МПа. Результаты исследований приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Крутильные колебания стального образца марки У10

τ , МПа		100	160	170
δ , %	а	1,3	2,9	2,9
	б	0,75	2,3	-
	в	0,45	1,95	2,25
	г	0,9	2,55	-
	д	1,6	3,15	-
	е	1,15	2,85	-
	ж	1,75	3,35	-

В значительной степени, как показывают исследования [82], на рассеивание энергии в материалах, существенно влияют геометрические формы образцов в поперечном сечении (Рисунок 2.7).

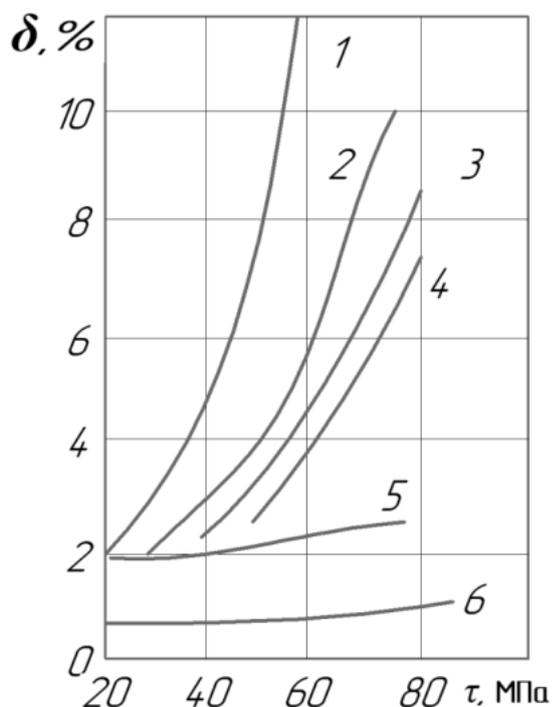


Рисунок 2.7 – Зависимости декремента крутильных колебаний от максимальных напряжений для образцов с поперечными сечениями: 1 – крестовое сечение, +; 2 – двутавровое, I; 3 – тавровое, L; 4 – уголковое, L; 5 – полоса, |; 6 – дуговое, U

Проведённые многочисленные исследования показали, что термообработанная Сталь 40Х с напряжением 100 МПа и декрементом в 1 %, уступает Стали 45 с напряжением 100 МПа и декрементом в 1,48 % при крутильных колебаниях. Однако максимальная допустимая нагрузка при

крутильных $\tau_{кр} = 330$ МПа и изгибных колебаниях $\sigma_{из} = 520$ МПа у Стали 40Х в термообработанном состоянии выше, чем у Стали 45 с показателями $\tau_{кр} = 181$ МПа и $\sigma_{из} = 480$ МПа. Эти показатели являются немаловажными, так как при больших вылетах расточной оправки возникают высокие крутильные и изгибные нагрузки. Вдобавок к имеющимся преимуществам Стали 40Х можно добавить повышенную коррозионную стойкость, по отношению к Стали 45.

Проводя сравнения конструкционных сталей с инструментальной Сталью У10, можно сказать, что крутильные колебания демпфируются быстрее в инструментальной. Однако, несмотря на высокую твёрдость металла, основным недостатком является низкая износостойкость и труднообрабатываемость путём механической обработки.

Следовательно, для изготовления антивибрационной расточной оправки, из представленных металлов рационально выбрать Сталь 40Х круглого сечения с последующей термической обработкой. С другой стороны достичь увеличения эффекта рассеивания амплитуды автоколебательного процесса за счёт исключительно внутреннего демпфирования достаточно сложно. Поэтому необходимо предусмотреть конструктивное демпфирование в конструкции антивибрационной расточной оправки.

2.2 Обоснование выбора конструкционного демпфирования для антивибрационной расточной оправки

На подавление автоколебаний в замкнутых технологических системах механической обработки, наравне с демпфирующей способностью материала, заметное влияние оказывают энергетические потери внутри самой конструкции (конструкционное демпфирование). Данные потери возникают из-за трения в кинематических парах, ещё можно встретить в соединениях типа прессовых, шлицевых, резьбовых, заклёпочных и т.п. Поскольку представленные соединения полагается называть неподвижными, по факту,

при их нагружении, по контактными поверхностям непременно возникают малые проскальзывания. При этом на определённых относительных микроперемещениях силы трения совершают работу, что дополнительно позволяет рассеивать часть поступившей в систему энергии.

Проведённый ряд экспериментальных исследований в работе [15, 18, 53, 84, 85, 113, 115] позволяет сделать заключение, что влияние коэффициента поглощения на частоту колебаний ничтожно. Другими словами, силы трения на контактных поверхностях прямо подчиняются закону Амонтона-Кулона.

По этой причине, в современные расточные оправки интегрируются различного рода элементы, способствующие увеличению рассеивания энергии в подсистеме «инструмент». К ним можно отнести введение: пружинного одномассового демпфера; каткового инерционного динамического гасителя; маятникового инерционного динамического гасителя; инерционного динамического гасителя с активными элементами; поглотителя колебаний с вязким или сухим трением.

На практике такие сложные конструкционные решения, по рассеиванию энергии в расточных оправках, имеют следующие недостатки: узкие технологические возможности; сложность настройки инструмента, тем самым увеличивая время технологического обслуживания инструмента; низкий антивибрационный эффект; большие затраты на изготовление инструмента.

На основании вышеописанной проблемы и в соответствии с предлагаемой теорией о подавлении автоколебательного процесса при механической обработке, предлагается интегрировать в корпус расточной оправки конструктив с сухим трением, который позволил бы управлять механическими свойствами в периферии инструмента, сближая частоты в контуре y и x .

С целью решения данного вопроса был проведён анализ значений коэффициентов поглощения в различных стыках.

При исследовании в работе [82] коэффициента поглощения в плоских стыках экспериментально отмечено:

– в стыках стальных и чугунных деталей коэффициент поглощения энергии колебаний практически одинаков;

– в диапазоне давлений от 0,1 до 2,0 МПа в сухих стыках коэффициент поглощения совсем не зависит от давления; в стальных и чугунных стыках с шабреными или шлифованными поверхностями он равен 0,15;

– в парах текстолит – чугун коэффициент поглощения энергии равен 0,35;

– в полусухих стыках (количество смазки – 1 мг/см²) коэффициент поглощения больше, чем в сухих и возрастает с увеличением вязкости смазки, а уменьшается с увеличением давления (Рисунок 2.8);

– коэффициент поглощения не зависит от размеров стыка и слабо возрастает с увеличением ширины поверхности контакта.

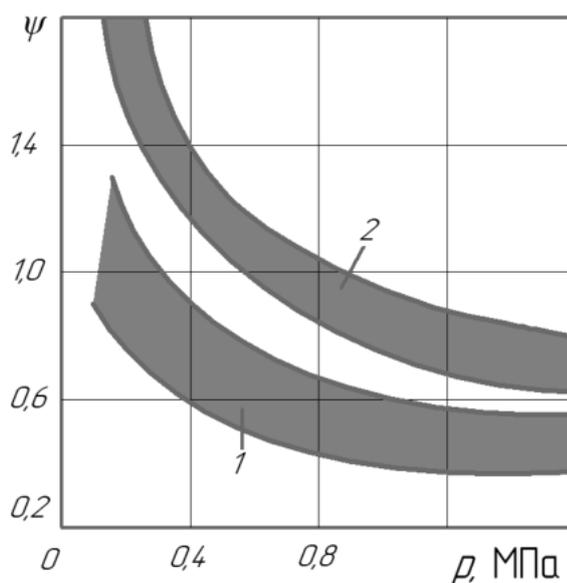


Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента поглощения энергии от давления, где:

1 – узкие прямоугольные контактные зоны в области стыка; 2 – широкие кольцевые контактные зоны в области стыка

Исследования влияния конусообразных стыков на коэффициент поглощения, проводились на конусах длиной 70 мм. Испытуемый материал – Сталь 45 после термической обработки с твёрдостью HRC 48-50 единиц. Частота колебаний при определении коэффициента поглощения 50 Гц. Полученные значения приведены в таблице 2.6. По имеющимся данным

можно сказать однозначно, что наибольшей демпфирующей способностью обладает конический стык [29, 82].

Таблица 2.6 – Коэффициенты рассеивания и демпфирования в узловых стыках станков [29]

При колебании без скольжения	Коэффициент рассеивания энергии	
	Цилиндрический стык	Конический стык
Без смазки при давлении = 2,4 Н/мм ²	0,25	0,37
То же – при $\rho_\delta = 16,8$ Н/мм ²	0,29	0,40
То же – со смазкой, $\rho_\delta = 2,4$ Н/мм ²	0,60	0,70
То же – со смазкой, $\rho_\delta = 16,8$ Н/мм ²	0,35	0,48
Плоский стык без смазки, $\rho_\delta = 54$ Н/мм ²	0,08	0,10

Результаты коэффициента поглощения в резьбовых соединениях при изгибных колебаниях получены при испытаниях резьбового стыка с резьбой М20 и резьбой с мелким шагом М20х1,5. Длина стыка 70 мм. Твёрдости HRC деталей из Сталь 45 с термической обработкой поверхностей достигает 48 – 50 единиц. Частота колебаний при исследовании изменялась в диапазоне 50 – 125 Гц [82].

В сухом и в полусухом стыке ($\Psi = 0,006...0,4$) диапазон изменения коэффициента поглощения фактически одинаков и совсем не зависит от силы затяжки в диапазоне $P_{зам} = 2,9...15$ кН.

К резьбовым соединениям, по своим свойствам, близки ходовые передачи винт-гайка. Коэффициенты поглощения при изгибных колебаниях в таких передачах определяли на образцах, имеющих размеры $\varnothing 50 \times 8$ и $\varnothing 70 \times 10$ мм. В передачах без смазки коэффициент поглощения практически не зависит от начальной нагрузки $\Psi = 0,17...0,20$. При наличии смазки до 1 мг/см² и возрастании постоянного предварительного давления коэффициент поглощения уменьшается от 0,75 до 0,45.

Подводя итоги проведённого анализа, можно с большой уверенностью сказать, что при разработке антивибрационной расточной оправки помимо механизмов рассеивания энергии (скольжения на границе зёрен, пластических деформаций микрообъёмов материала, внутреннего рассеивания) необходимо учесть конструктивное демпфирование, которое будет реализовано за счёт разжимного конуса, регулируемого резьбовым соединением.

2.3 Технология изготовления антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом

Традиционными инструментальными материалами комбинированные поверхности сложно поддаются механической обработке, следовательно, необходимы дополнительные технологические решения. Предварительные результаты исследования, проведённые на предприятии ООО «НПП «Орион» производились на горизонтальном токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L300C (Приложение Б) с использованием антивибрационного инструмента Silent Tools от компании Sandvik с глубиной резания $t_{рез} = 0,3$ мм, оборотов шпинделя $n_{об} = 650$ об/мин и подачей $S_{рез} = 0,08$ мм/об. При растачивании детали «Труба» столкнулись с рядом проблем, связанных с разнородностью сварной конструкции.

Так при переходе расточного инструмента из одного материала в другой, интенсивность колебаний возрастает (Рисунок 2.9, а), что приводит к образованию задиров и возникновению глубоких рисок на зеркале детали «Труба» (Рисунок 2.9, б). Затем при переходе границы раздела двух материалов процесс стабилизируется, но поскольку режимы механической обработки были подобраны для достижения необходимой шероховатости в электромагнитной стали, на участке с конструкционной сталью образуются высокие показатели качества поверхности [74].

Это явление объясняется, во-первых, различной обрабатываемостью двух материалов (1 – Сталь 45 ГОСТ 1050-2013, 2 – нержавеющая сталь

12X18H10T ГОСТ 5949-2018), во-вторых, особенностью выбранного инструмента для растачивания такого отверстия.

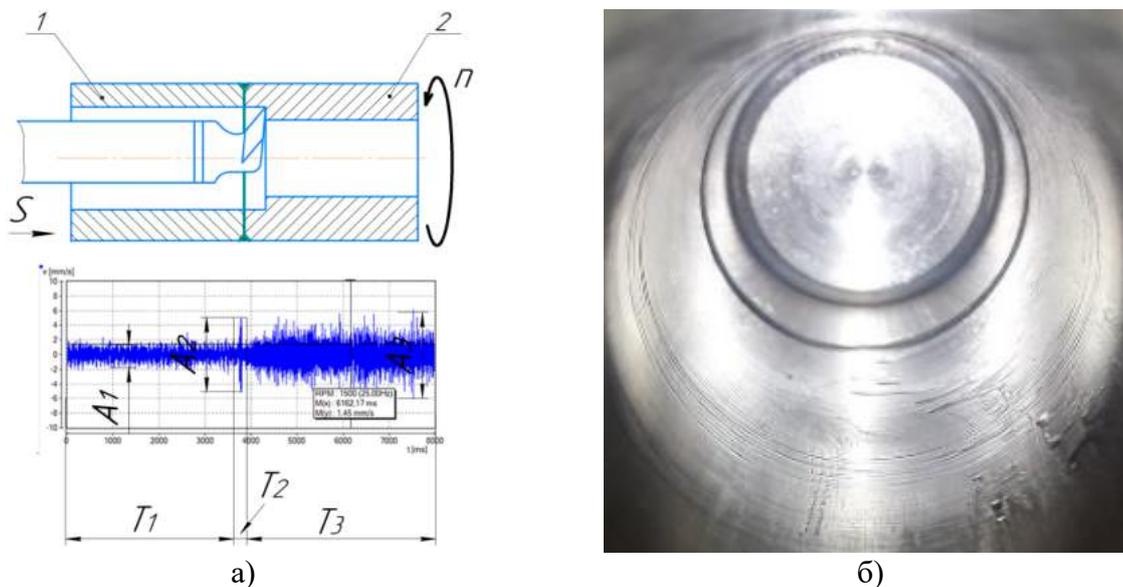


Рисунок 2.9 – Технологический процесс изготовления детали «Труба», где:
 а – вибродиаграмма при растачивании отверстия в детали «Труба» с использованием антивибрационного инструмента Silent Tools; б – задиры и глубокие риски на зеркале детали «Труба»

На Рисунке 2.9, а представлены результаты проведённого экспериментального исследования, зафиксированного на осциллограмме вибродиагностической установки «Prüftechnik MT GmbH». По представленному графику можно выделить три участка:

T_1 – растачивание по нержавеющей стали 12X18H10T ГОСТ 5949-2018, сопровождается колебаниями амплитудой A_1 ;

T_2 – прерывистое растачивание в месте стыка двух разнородных сталей, сопровождается совместным действием на оправку - вынужденных и автоколебаний с амплитудой A_2 ;

T_3 – растачивание по Сталь 45 ГОСТ 1050-2013, сопровождается колебаниями амплитудой A_3 .

Руководствуясь анализом конструкций в Главе 1, можно сделать следующий вывод. Одним из наиболее эффективных способов механической обработки внутренних прецизионных поверхностей деталей типа «штулок» запорных электромагнитных кранов является инструментальное оснащение,

основанное на использовании предварительного напряжённо-деформированного состояния державочной части токарного инструмента. Такая расточная оправка обладает повышенными диссипативными свойствами, позволяющими снизить уровень колебательных процессов в процессе растачивания, повысить качество и точность механической обработки внутренних прецизионных поверхностей деталей, состоящих из разнородных материалов [95, 101].

2.3.1 Трёхмерное моделирование конструкции напряжённо-деформированной оправки

На сегодняшний день невозможно создать качественное, конкурентоспособное и надёжное изделие без применения компьютерного 3D моделирования. На первоначальном этапе проектирования зададимся следующей принципиальной схемой инструментальной оснастки (Рисунок 2.10), описанной в патенте № 191536 РФ: [80] (Приложение В).

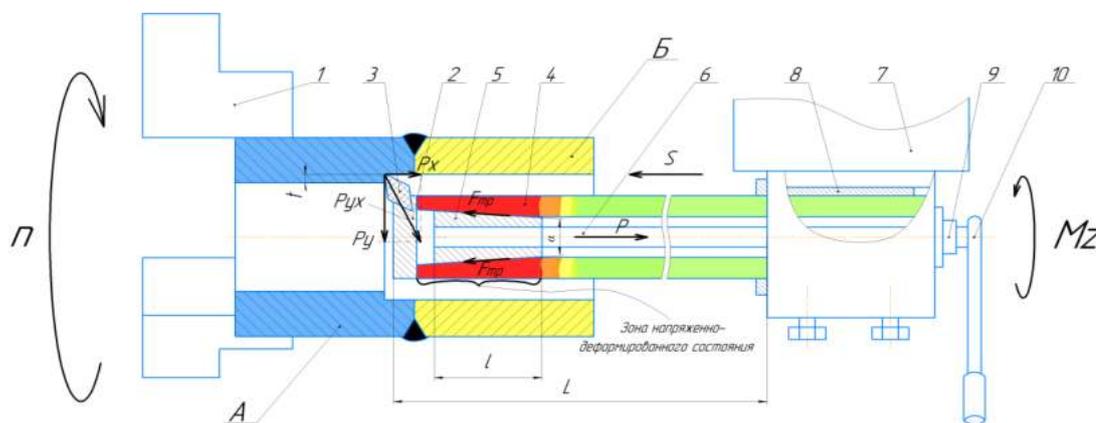


Рисунок 2.10 – Принципиальная схема напряжённо-деформированной оправки

Заготовка, сваренная из разнородных сталей А и Б, закрепляется в трёхкулачковом патроне 1 горизонтального токарного станка. Расточной инструмент представляет из себя борштангу, снабжённую резцовой головкой 2, для крепления режущей пластины 3 и состоит из полого корпуса 4, в полости которого располагается разжимной конус 5 и резьбовой стержень 6. Корпус 4

расточной оправки устанавливают в блок револьверной головки 7 через разрезную втулку 8 с вылетом L . Стержень 6 жёстко связан с конусом 5, которые свободно перемещаются вдоль оси корпуса 4 путём закручивания регулировочной гайки 9 динамометрическим ключом 10. Затягивание регулировочной гайки 9 динамометрическим ключом 10 с моментом затяжки Mz обеспечивает ход разжимного конуса 5 с резьбовым стержнем 6, вдоль оси пустотелого корпуса 4 с силой натяжения P с ограничением хода о внутреннюю конусную поверхность пустотелого корпуса 4 длиной l , создавая в периферии корпуса 4 равномерное напряжённо-деформированное состояние. Для проектирования элементов напряжённо-деформированной оправки использовалась программа для трёхмерного моделирования КОМПАС 3D Версии 17, которая позволяет создать трёхмерные параметрические модели как отдельных деталей, так и элементов конструкции в сборе. Исходя из принципиальной схемы (Рисунок 2.10) создана трёхмерная сборочная модель будущей расточной оправки (Рисунок 2.11).

Инструмент состоит из отдельных элементов, таких как: токарный резец 2, режущая пластина 1, резцовая голова 3, винты для крепления токарного резца 4, разжимной конус 5, корпус оправки 6, винты для крепления резцовой головы 7, шайбы 8 и пружинной шайбы 9, регулировочный винт 10 и разрезной втулки 11.

Воспользовавшись станкостроительным оснащением предприятия ООО «НПП «Орион», был создан прототип расточного инструмента.

В качестве заготовок для деталей борштанга, резцовая голова и конус был взят горячекатаный круглый прокат стали 40Х ГОСТ 2590-2006 диаметром 60 мм. На основе конструкторско-технологических решений и проведённого выше анализа была разработана конструкция будущей оправки. На горизонтальном токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L300 LC были изготовлены основные элементы конструкции расточной напряжённо-деформированной оправки: корпус оправки, разжимной конус, резцовая голова. Следуя основному принципу технической унификации остальные

элементы проектируемой antivибрационной расточной оправки взяты стандартные (ГОСТ и DIN).

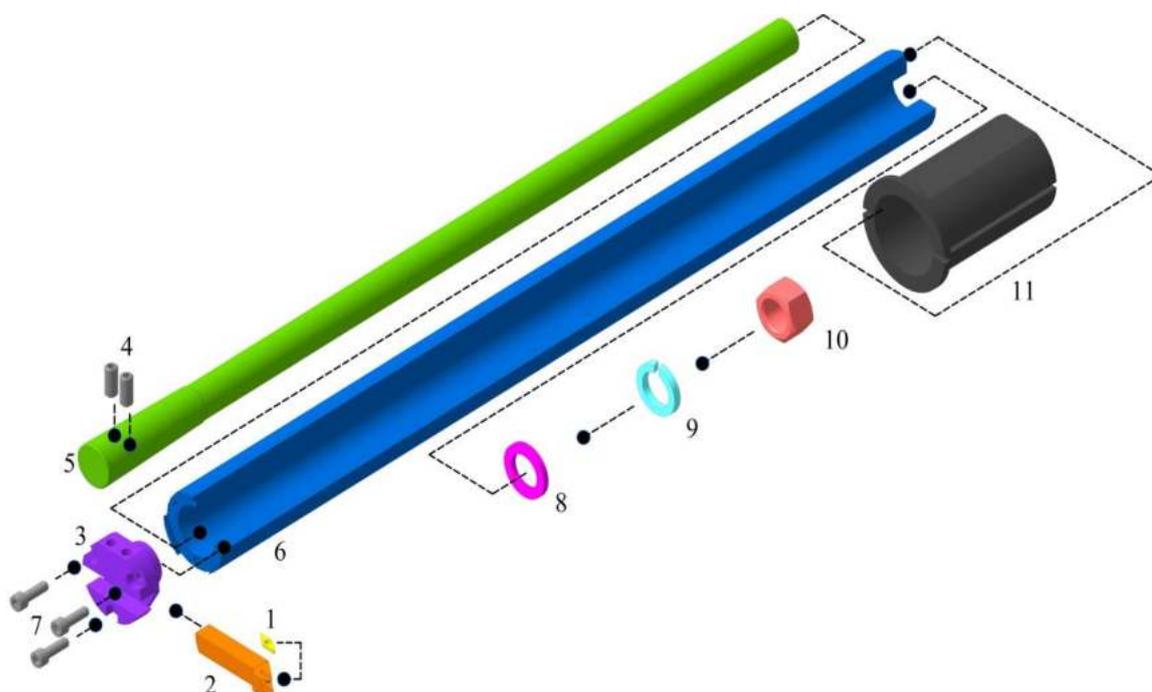


Рисунок 2.11 – Развёртка сборочной модели напряжённно-деформированной расточной оправки, где: 1 – режущая пластина; 2 – токарный резец; 3 – резцовая голова; 4 и 7 – винты; 5 – разжимной конус; 6 – корпус оправки; 8 – шайба; 9 – пружинная шайба; 10 – регулировочный винт; 11 – разрезная втулка

Предварительно обработанная заготовка корпуса расточной оправки, для последующей закалки в электропечи, имеет следующие основные размеры: наружный диаметр 55 мм; габаритный размер 605 мм; осевое отверстие диаметром 22,5 мм.

Конус представляет из себя деталь с осевым отверстием 22 мм и конусом Морзе снаружи. Заготовка корпуса оправки далее подвергается закалке с последующим отпуском. Согласно технологии закалки длинномерных полых деталей, процесс закалки проводился в вертикальном положении ввиду изгиба заготовки в случае горизонтального расположения детали в процессе охлаждения в масле.

Процесс термической обработки проводился следующим образом: закалка осуществлялась в разогретой электропечи до 860 °С, в которой заготовка была установлена в вертикальном положении на 25-30 минут до полного процесса аустенизации. Охлаждение заготовки проходило в вертикальном положении в ванне с маслом в течение 25 минут. Для последующего снятия остаточных напряжений, производился средний отпуск в разогретой электропечи до 450 °С. Заготовка опускалась в вертикальном положении на 15-20 минут. Охлаждение проводилось на открытом воздухе в течение 2,5 часов [77, 90].

Отпуск корпуса расточного инструмента проводился сразу после окончания закалки, так как была вероятность возникновения трещин в структуре заготовки. Отпуск обеспечил улучшение структуры материала, повысил пластичность, устранил хрупкость и остаточные напряжения, возникшие во время закалки. Так твёрдость горячекатаного круглого проката до закалки составляла по Бринеллю не более 165 НВ, после закалки с последующим отпуском твёрдость повысилась до 376 НВ. На токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L300LC проводилась окончательная обработка корпуса оправки. Так в торцевой части корпуса расточной оправки, сформированы три выступа точно сориентированные по лыскам в резцовой голове (Рисунок 2.12), предотвращая прокручивание последнего в процессе обработки отверстий в сварных деталях.

Ввиду необходимости точной ориентации и плотного совмещения деталей между собой по конусным поверхностям с целью обеспечить необходимый запирающий эффект узлов расточной оправки, последующая обработка корпуса расточного инструмента проводилась на том же станке с ЧПУ, что и деталей «Резцовая голова» и «Разжимной конус».

Общий вид расточного инструмента в разобранном состоянии с предварительным напряжённо-деформированным состоянием по истечении предварительных испытаний и доработки конструкции представлен на Рисунке 2.12.



Рисунок 2.12 – Напряжённно-деформированная расточная оправка в разобранном виде

Расточной инструмент (Рисунок 2.12) представляет из себя борштангу, снабжённую резцовой головкой (4) с подкладкой (3), для крепления токарного инструмента (2) (проходной, канавочный и др.) с режущей пластиной (1) через винты (6). Борштанга состоит из полого корпуса (8), в полости которого располагается разжимной конус (7), сваренный с резьбовым стержнем. К корпусу расточной оправки крепится резцовая головка (4) тремя винтами (5). Со стороны инструмента в корпусе оправки (8) имеется конусное отверстие, в которое упирается разжимной конус (7) всей своей наружной поверхностью посредством закручивания регулировочной гайки (10) с другого конца оправки посредством динамометрического ключа (12).

Здесь регулировочная гайка (10) упирается о торец через шайбу (9). Со стороны станка корпус оправки крепится через разрезную втулку (11) в блоке револьверной головки станка с ЧПУ, либо через специальное крепление в резцедержатель универсального токарного станка.

2.4 Определение динамических параметров антивибрационной расточной оправки при различной степени затяжки разжимного конуса

Для оценки эффективности влияния напряжённо-деформированного состояния разработанной антивибрационной расточной оправки при различных вылетах на её демпфирующие свойства и жёсткость, необходимо произвести динамические сравнительные испытания со стандартным расточным инструментом. В эксперименте будут устанавливаться такие динамические показатели как жёсткость c_i , демпфирующие свойства b_i и приведённая масса m_i .

2.4.1 Определение жёсткости антивибрационной расточной оправки при различной степени затяжки разжимного конуса

В настоящей работе жёсткость антивибрационной расточной оправки определяется как отношение приложенной силы $P(N)$ к смещению нагружаемого инструмента по направлению выбранной координаты, в данном случае y (мкм):

$$c = \left(\sum_{i=1}^n \frac{P}{y} \right) / n. \quad (2.1)$$

При этом упругие свойства антивибрационной расточной оправки и стандартного инструмента обычно невозможно определить одним коэффициентом жёсткости, так как зависимость между силой и упругой характеристикой является нелинейной. Тогда при расчётах, как правило, осуществляют аппроксимацию, т.е. нелинейную характеристику в рабочем диапазоне резания заменяют линейной функцией [113, 115, 116].

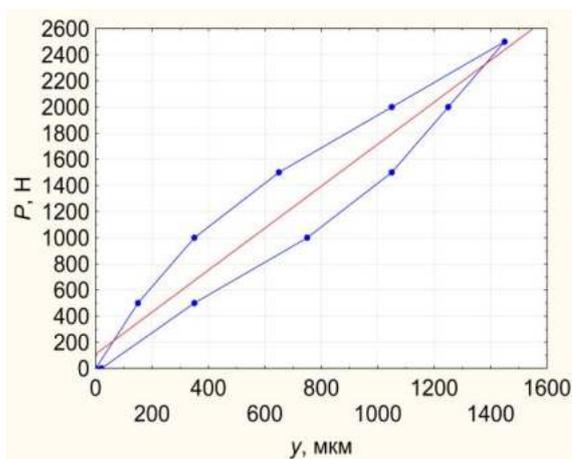
На стадии лабораторных испытаний, антивибрационную расточную оправку и стандартный инструмент нагружали ступенчато с шагом в 500 Н и возрастающим усилием от 0 до 2500 Н. Испытываемые расточные оправки

устанавливали в revolverную головку высокопроизводительного станка с ЧПУ.

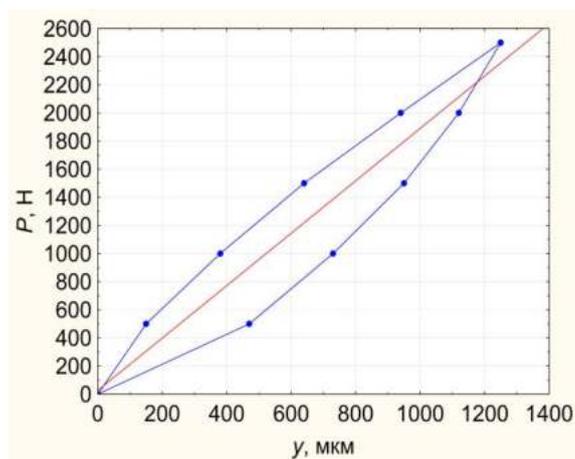
Нагрузка на расточную оправку передавалась через динамометр, при этом одновременно регистрировались соответствующие перемещения. Возникающие усилия имитируют силу резания при растачивании разнородных материалов. Разгрузку антивибрационной оправки производят аналогично с нагрузкой – ступенчато.

Значения проведенного эксперимента по нагрузке и разгрузке антивибрационной расточной оправки, в зависимости от вылетов и степени затяжки, представлены в виде графиков «нагрузка – перемещение» на Рисунке 2.13 (а, б, в, г). Результаты исследований приведены при 10 вылетах [35, 37].

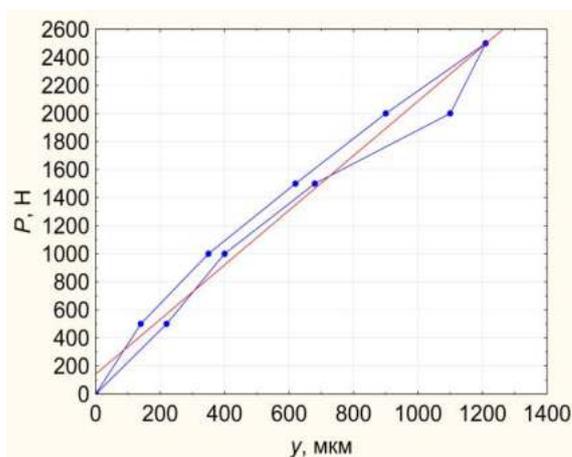
Обычно разгрузочная и нагрузочная ветви графика не совпадают друг с другом, что является формированием петли гистерезиса. Площадь, образованная кривыми петли гистерезиса, — это работа, затраченная на силы собственного веса инструмента, преодоление силы трения в стыках, контактных деформаций.



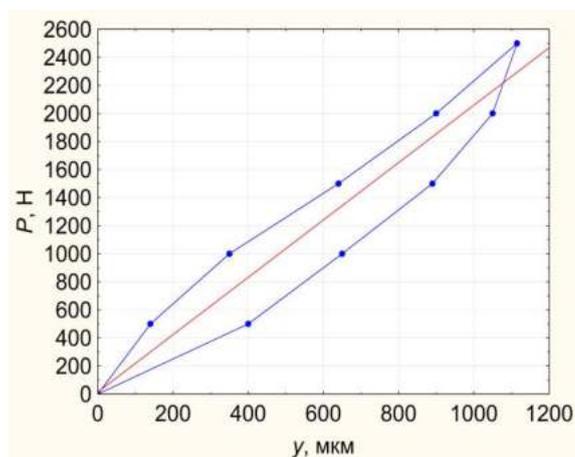
а) График «нагрузка – перемещение» стандартной расточной оправки, $c = 1,9 \cdot 10^6$ Н/м



б) График «нагрузка – перемещение» антивибрационной расточной оправки при $M_{кр} = 60$ Н·м, $c = 2 \cdot 10^6$ Н/м



в) График «нагрузка – перемещение» антивибрационной расточной оправки при $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $c = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$



г) График «нагрузка – перемещение» антивибрационной расточной оправки при $M_{кр} = 120 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $c = 2,2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$

Рисунок 2.13 – Графики «нагрузка – перемещение» стандартной и антивибрационной расточной оправки в условиях 10 вылетов и различных степеней предварительного напряжено-деформированного состояния

На ветви графика «нагрузка – перемещение» может находиться один или несколько ярко выраженных перегибов. Отсюда делаем вывод, что жёсткость этого узла характеризуется различными значениями в разных диапазонах нагрузки [29]. Тогда жёсткость узла находят на отдельных участках и снимают несколько значений жёсткости соответствующие выбранным диапазонам нагрузки (таблица 2.7). Затем с целью нахождения среднего значения жёсткости, строится аппроксимирующая прямая.

Таблица 2.7 – Показатели жёсткости разработанной оправки и стандартного инструмента

Степень затяжки $M_{кр}$, Н · м	Вылет оправки l , м	Жёсткость оправки c , Н/м
0	0.2	$9,5 \cdot 10^6$
	0.3	$5,8 \cdot 10^6$
	0.4	$4,8 \cdot 10^6$
	0.5	$1,9 \cdot 10^6$
60	0.2	$8,9 \cdot 10^6$
	0.3	$5,8 \cdot 10^6$
	0.4	$4,4 \cdot 10^6$
	0.5	$2,0 \cdot 10^6$

90	0.2	$9,3 \cdot 10^6$
	0.3	$6,2 \cdot 10^6$
	0.4	$3,9 \cdot 10^6$
	0.5	$2,4 \cdot 10^6$
120	0.2	$8,3 \cdot 10^6$
	0.3	$6,1 \cdot 10^6$
	0.4	$3,1 \cdot 10^6$
	0.5	$2,2 \cdot 10^6$

Проведённая серия сравнительных испытаний показала, что жёсткость антивибрационной оправки с предварительно напряжённо-деформированным состоянием при силе затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и 10 вылетах выше, чем у стандартного инструмента (Рисунок 2.14).

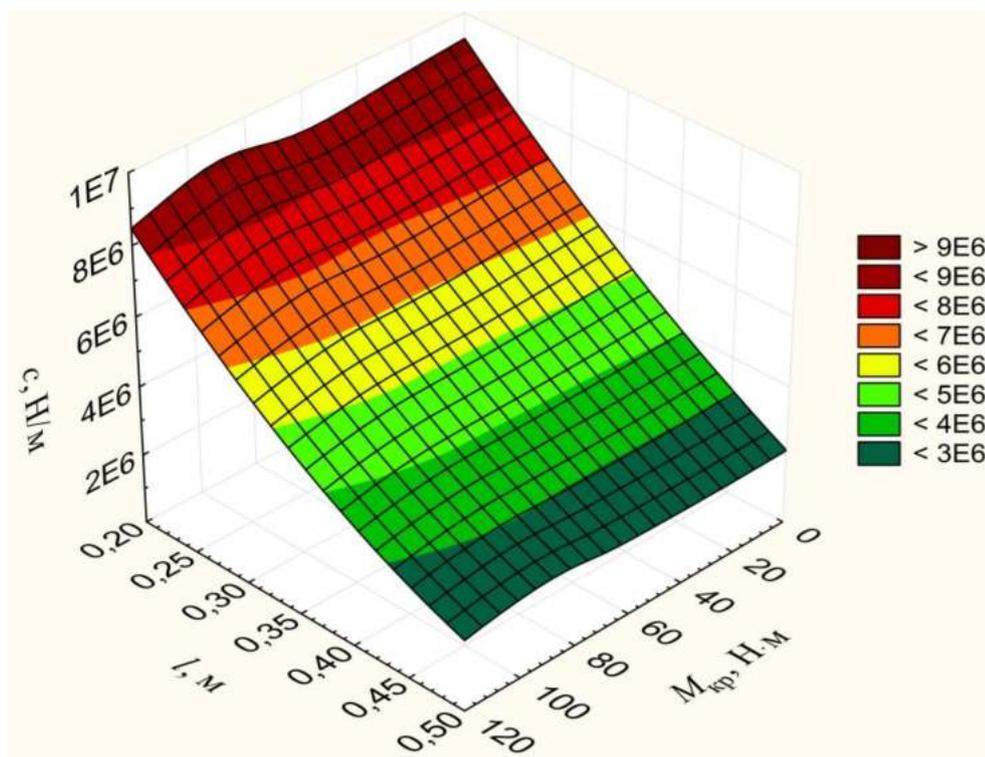


Рисунок 2.14 – Влияние степени затяжки антивибрационной расточной оправки и стандартного инструмента при различных вылетах на жёсткость

В остальных случаях, влияние напряжённо-деформированного состояния антивибрационной оправки не оказывает воздействие на

повышение жёсткости по сравнению со стандартной оправкой. Поэтому, для подтверждения изложенной гипотезы, необходимо провести дополнительные испытания, которые позволят установить влияние изменяющегося напряжённо-деформированного состояния антивибрационной оправки на демпфирующие свойства.

2.4.2 Определение демпфирующих свойств и приведённой массы антивибрационной расточной оправки при различной степени затяжки разжимного конуса

Демпфирующие свойства антивибрационной расточной оправки и стандартного инструмента определяются наиболее эффективным методом, основанным на нахождении собственных частот колебаний, которые возбуждаются под действием импульсной ударной нагрузки с последующей записью полученного сигнала виброскорости.

Для определения собственной частоты колебаний антивибрационной расточной оправки и стандартного инструмента, установленных в revolverной головке станка с ЧПУ, использовался вибродиагностический прибор модели «Prüftechnik MT GmbH». В комплект к данному прибору входят два высокочувствительных пьезоэлектрических акселерометра, считывающих информацию в частотном спектре от 1 Гц до 25 кГц.

Датчики с пьезоэлектрическими акселерометрами устанавливались поочерёдно в трёх направлениях, соответствующих координатам станка с ЧПУ x , y , z (Рисунок 2.15).

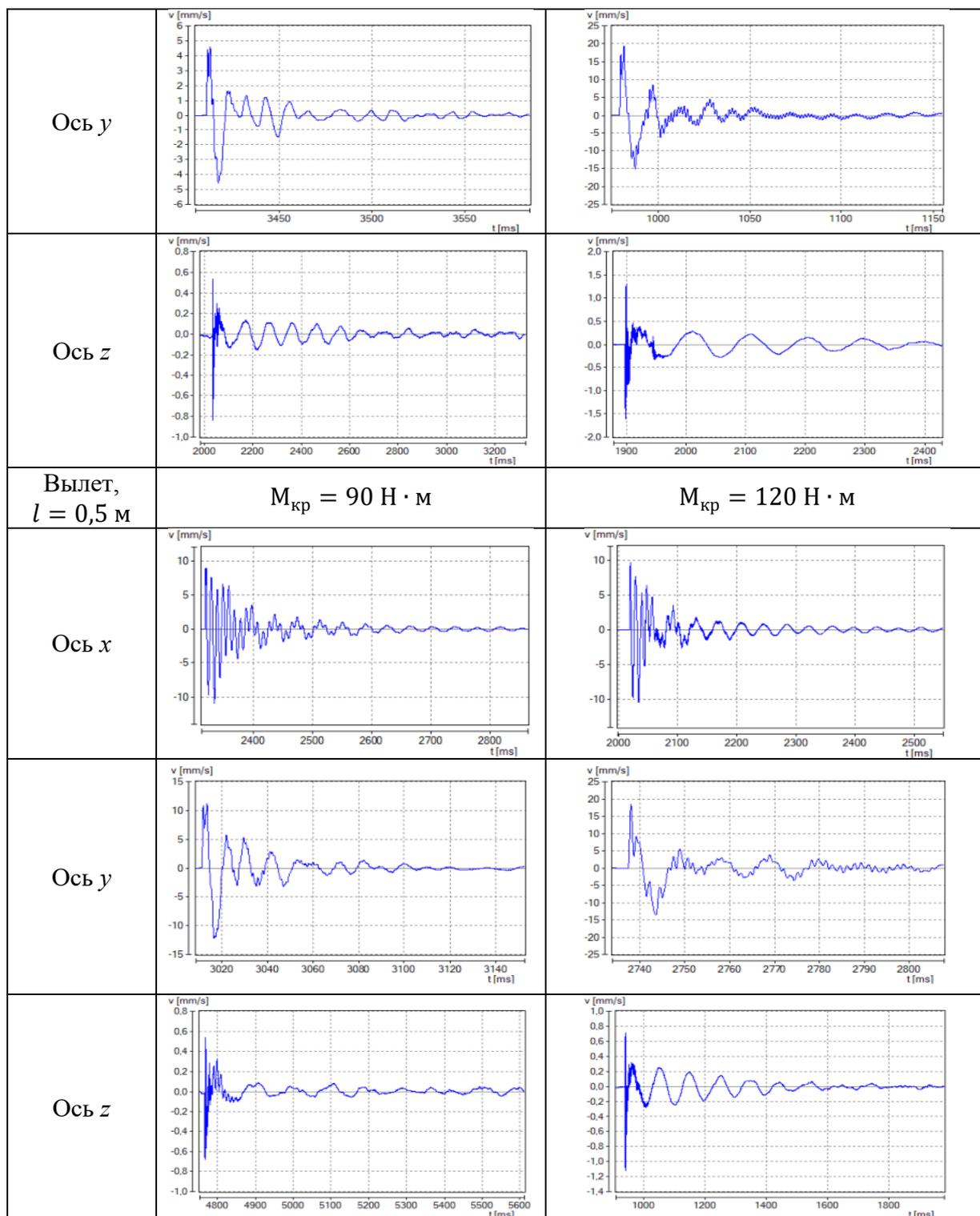


Рисунок 2.15 – Определение свойств демпфирования стандартной и антивибрационной расточной оправки

Импульсное возбуждение консольной части расточных оправок осуществлялось при помощи обрзиненного молотка. Результаты проведённых испытаний позволили определить собственные затухающие колебания по трём координатным осям x , y , z расточного инструмента [15] при различных вылетах и степени напряжённо-деформированного состояния (Рисунок 2.15) [86, 87].

Таблица 2.8 – Собственные затухающие колебания испытываемых расточных оправок при вылете $l=0,5$ м

Вылет $l = 0,5$ м	Стандартная	$M_{кр} = 60 \text{ Н} \cdot \text{м}$
Ось x		



Частота свободных затухающих колебаний $f_{\text{кол}}$ определялась по вышеприведённым виброграммам из соотношения по формуле:

$$f_{\text{кол}} = \frac{n}{l_{\text{кол}}}, \quad (2.2)$$

где n – количество полных колебаний; $l_{\text{кол}}$ – период колебаний, с.

Тогда логарифмический декремент колебаний δ получается из следующей формулы:

$$\delta = (\ln \cdot \frac{A_i}{A_{i+n}}) / n, \quad (2.3)$$

где A_i и A_{i+n} – амплитуды колебаний, которые отстают друг от друга на количество периодов, n .

Результаты проведённых испытаний с рассчитанным логарифмическим декрементом, согласно формуле 2.3, сведены в таблицу 2.9.

Таблица 2.9 – Показатели логарифмического декремента колебаний разработанной оправки и стандартного расточного инструмента

Степень затяжки $M_{кр}$, Н · м	Вылет оправки l , м	Координата	Логарифмический декремент колебаний δ
Стандартный инструмент	0.2	x	0,82
		y	0,85
		z	0,32
	0.3	x	0,59
		y	0,45
		z	0,48
	0.4	x	0,37
		y	0,32
		z	0,46
	0.5	x	0,51
		y	0,42
		z	0,52
60	0.2	x	0,69
		y	0,83
		z	0,34
	0.3	x	0,56
		y	0,38
		z	0,4
	0.4	x	0,6
		y	0,28
		z	0,42
	0.5	x	0,65
		y	0,49
		z	0,66

90	0.2	<i>x</i>	0,87
		<i>y</i>	0,34
		<i>z</i>	0,37
	0.3	<i>x</i>	0,62
		<i>y</i>	0,32
		<i>z</i>	0,38
	0.4	<i>x</i>	0,42
		<i>y</i>	0,33
		<i>z</i>	0,36
	0.5	<i>x</i>	0,21
		<i>y</i>	0,46
		<i>z</i>	0,63
120	0.2	<i>x</i>	0,64
		<i>y</i>	0,53
		<i>z</i>	0,3
	0.3	<i>x</i>	0,39
		<i>y</i>	0,59
		<i>z</i>	0,34
	0.4	<i>x</i>	0,61
		<i>y</i>	0,44
		<i>z</i>	0,38
	0.5	<i>x</i>	0,11
		<i>y</i>	0,53
		<i>z</i>	0,43

Для окончательного расчёта силы сопротивления необходимо найти приведённую массу. Приведённая масса рассчитывается с учётом полученных характеристик жёсткости антивибрационной расточной оправки и парциальных частот. Тогда значения приведённой массы рассчитывается по следующей формуле:

$$m = \frac{c}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{кол}}}. \quad (2.4)$$

Воспользовавшись выше приведённой формулой, были рассчитаны приведённые массы. Результаты зависимости между приложенной степенью затяжки, вылетом инструмента и приведённой массы приведены на Рисунке 2.16.

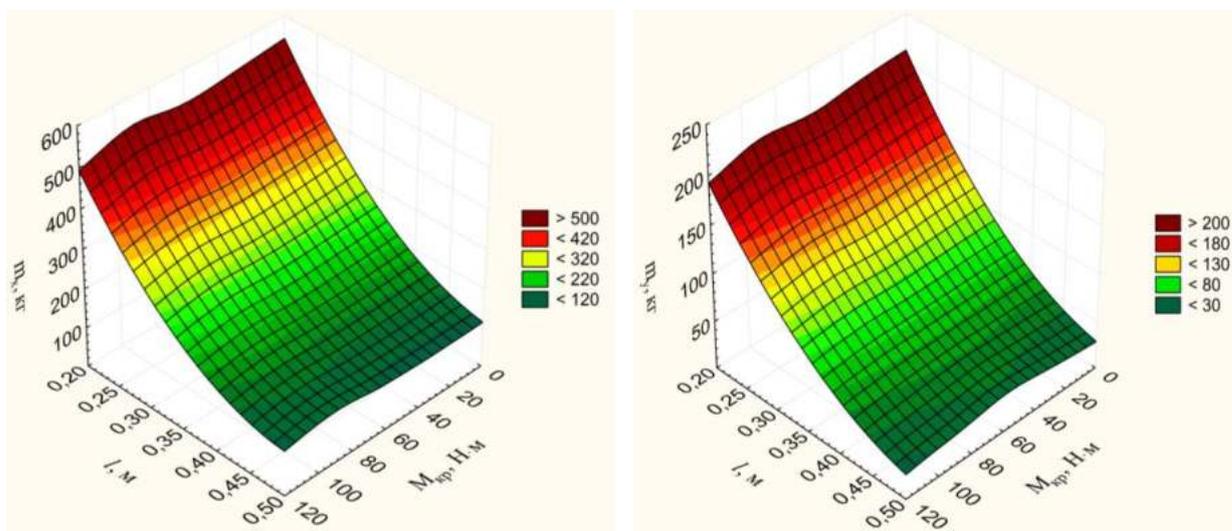
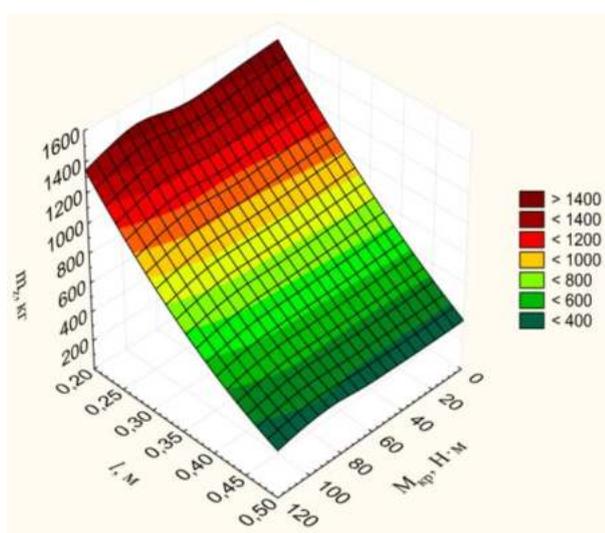
а) – Приведённая масса по оси x б) – Приведённая масса по оси y в) – Приведённая масса по оси z

Рисунок 2.16 – Влияние степени затяжки antivибрационной расточной оправки и стандартного инструмента при различных вылетах на приведённую массу

С учётом вышеизложенного получим формулу для определения сил сопротивления:

$$b = 2 \cdot \delta \cdot f_{\text{кол}} \cdot m. \quad (2.5)$$

В ходе проведённых испытаний были получены зависимости влияния вылета и степени напряжённо-деформированного состояния расточной оправки на демпфирующие свойства (Рисунок 2.17).

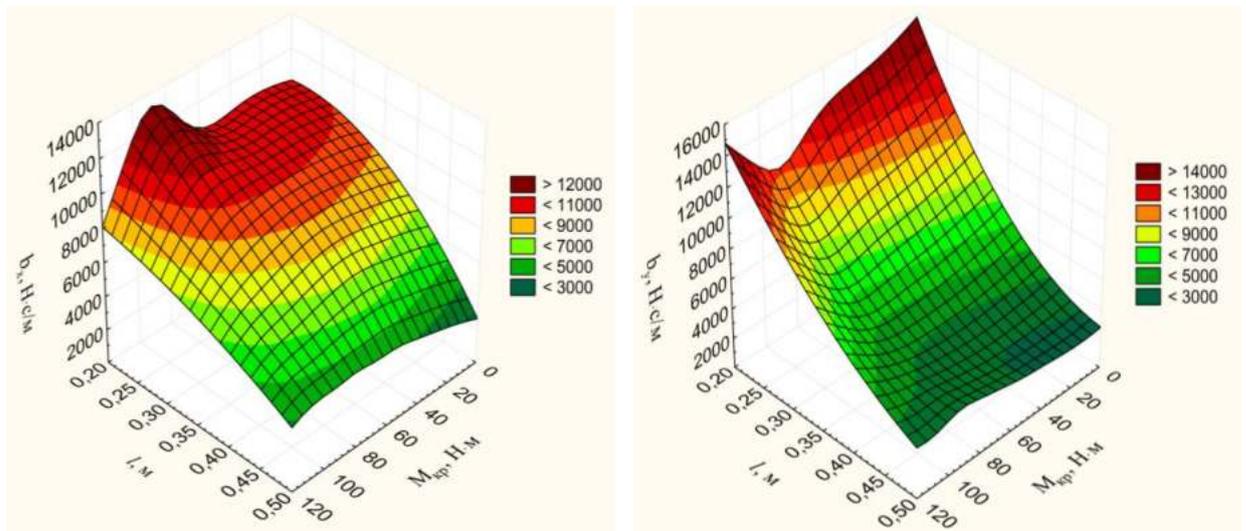
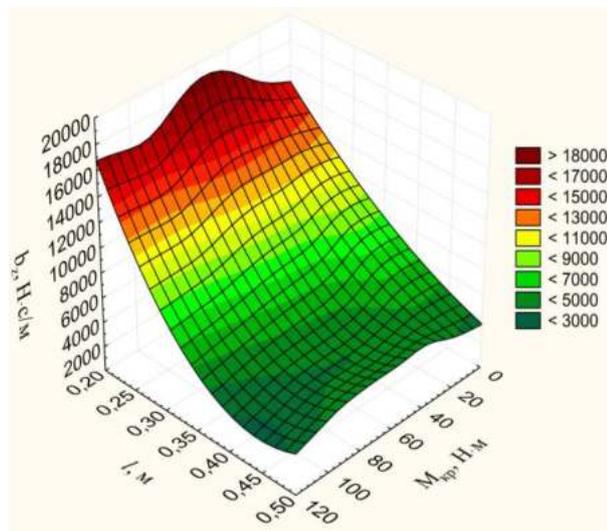
а) – Диссипативные силы по оси x б) – Диссипативные силы по оси y в) – Диссипативные силы по оси z

Рисунок 2.17 – Влияние степени затяжки antivибрационной расточной оправки и стандартного инструмента при различных вылетах на демпфирующие свойства

Из приведённых графиков можно сделать вывод, что antivибрационная расточная оправка по сравнению со стандартным инструментом обладает существенным преимуществом по демпфирующим свойствам. Это позволяет полагать, что разработанная инструментальная оснастка с регулируемой степенью напряжённо-деформированного состояния будет эффективно поглощать энергию колебательного процесса, возникающего при обработке внутренних прецизионных поверхностей деталей, сваренных из разнородных материалов, в технологическом процессе.

2.5 Определение собственных мод антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом в диапазоне

Для дальнейшего углублённого исследования и инженерного анализа разработанной конструкции расточной оправки на основе полученных выше характеристик и данных из научно-технической литературы, связанной с проектируемой системой, необходимо использовать современные программные вычислительные средства и основываясь на этом предложить новое конструктивное решение. Инженерный анализ тут, понимается как исследование напряжённо-деформированного состояния проектируемой конструкции расточного инструмента и определение её динамических характеристик. Наиболее приближенным и эффективным способом решения такой задачи оказывается метод конечных элементов (МКЭ).

Для оценки напряжённо-деформированного состояния конструкции нужно найти распределение напряжений в элементах проектируемой конструкции инструмента, параметры перемещений отдельных её точек не только при статическом характере нагружения, но и в условиях действия динамических нагрузок, изменяющихся во времени. Для решения такой задачи при традиционном подходе необходимо решить уравнения, которые обеспечивают выполнение условий совместности и равновесия деформаций. В связи с этим возникает проблема, заключающаяся в том, что в случае сложной двухмерной или трёхмерной конструкции поведение системы характеризуется уравнениями с огромным количеством неизвестных. Использование приближенных методов решения является одним из основных способов устранения этой проблемы. В наше время по причине активного внедрения в инженерную практику вычислительной техники наиболее приближенным эффективным методом решения прикладных задач механики является именно МКЭ [43, 93, 117]. Для полноценного анализа метода конечных элементов требуется:

- построить модель проектируемого инструмента в трёхмерном пространстве;
- разбить модель на конечные элементы;
- произвести необходимые вычисления;
- верифицировать конечные результаты и правильно истолковать их с целью усовершенствования конструкции.

2.5.1 Выбор типа конечного элемента

Метод конечных элементов (МКЭ) реализован в таких программных продуктах, как ANSYS, NASTRAN, COMSOL и некоторых других, которые обеспечивают прочностной расчёт проектируемых конструкций. Для проведения динамических, вибрационных исследований конструкции напряжённо-деформированной оправки была выбрана программа COMSOL Multiphysics (Рисунок 2.18), которая является мощным инструментом, позволяющим решать многие физические задачи, методами конечно-элементного анализа [54, 109, 111].

Для создания сетки конечных элементов в COMSOL Multiphysics возьмём конфигурацию сетки – Fine (Хорошее качество), считающуюся оптимальной для таких упрощённых трёхмерных моделей расточной оправки как на Рисунок 2.18, смоделированных на основе трёхмерной сборочной модели. Однако в местах скруглений для исключения излишнего сгущения и усложнения расчёта, воспользуемся операцией Ignore Edges, позволяющий убрать ненужные ограничения в построении сетки, оставив скругления в целом без изменений.

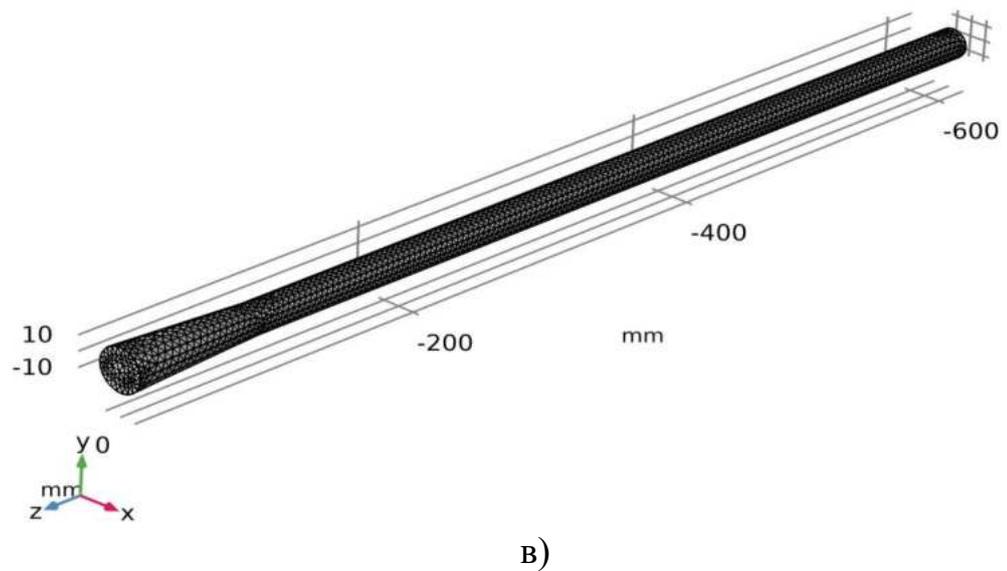
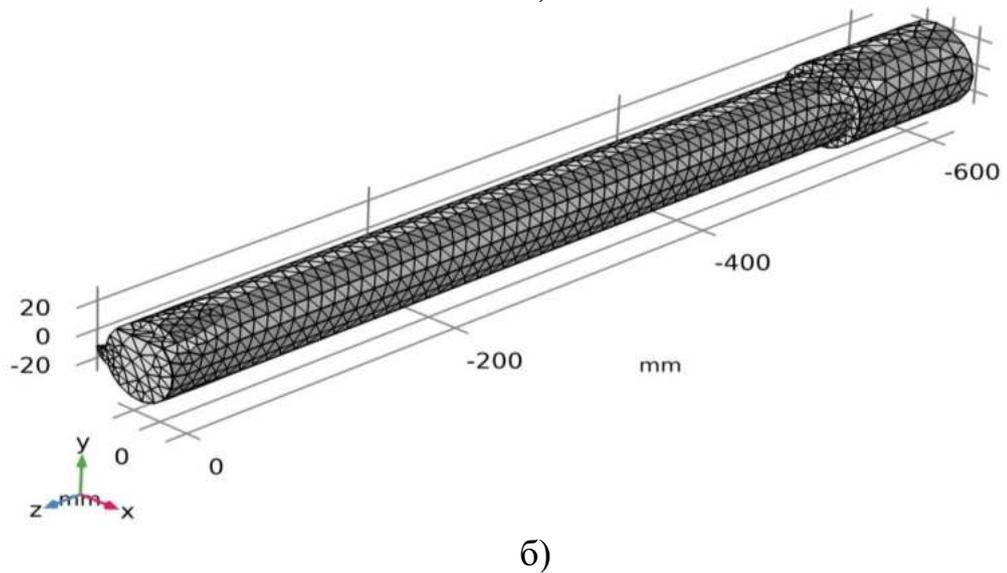
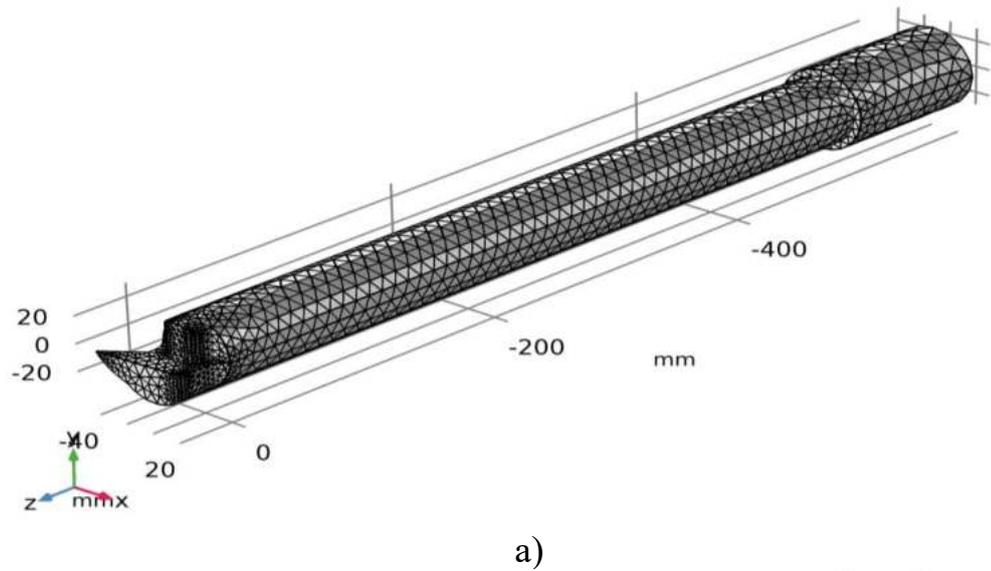


Рисунок 2.18 – Трёхмерна модель расточной оправки: а – сетка конечных элементов на стандартной расточной оправке; б – сетка конечных элементов на antivибрационной оправке; в – сетка конечных элементов на разжимном конусе

2.5.2 Определение собственных мод антивибрационной оправки на базе программы COMSOL Multiphysics

При помощи интерфейса SolidMechanics решателя Eigenfrequency программы COMSOL Multiphysics проведено исследование первых 6 мод разработанной расточной оправки от 4 до 10 вылетов.

К трёхмерным упрощённым моделям расточной оправки прикладываются граничные условия. На разрезную втулку накладывались ограничения в виде закреплений Fixed Constraint. Непосредственно к самой расточной оправке условия Spring Foundation и Added Mass, через которые задавались полученные значения приведённой массы, демпфирующих свойств и жёсткости.

Физико-механических свойств элементов конструкции: разжимной конус – модуль упругости $E = 211,9$ ГПа, плотность материала – $\rho = 7850$ кг/м³, коэффициент Пуансона – $\mu = 0,29$; корпус оправки – $E = 201,4$ ГПа. Стандартная расточная оправка обладает теми же характеристиками, что и корпус разработанного антивибрационного инструмента. Результаты имитационного математического моделирования собственных мод стандартной и антивибрационной оправки приведены на Рисунке 2.19.

Аналізу подвергали не все моды рассматриваемых оправок, а только те, которые демонстрируют существенное влияния на коэффициент демпфирования, добротность системы и совпадения собственных частот. На основе виртуального перемещения расточных оправок в системе COMSOL Multiphysics и полученных табличных значений, сведённых в таблицу 2.10.

Проведя анализ полученных результатов установлено, что наилучшие демпфирующие свойства у стандартной расточной оправки проявляются при 0,5 м вылета на второй моде с частотой 71,9 Гц, осциллируя вдоль оси y .

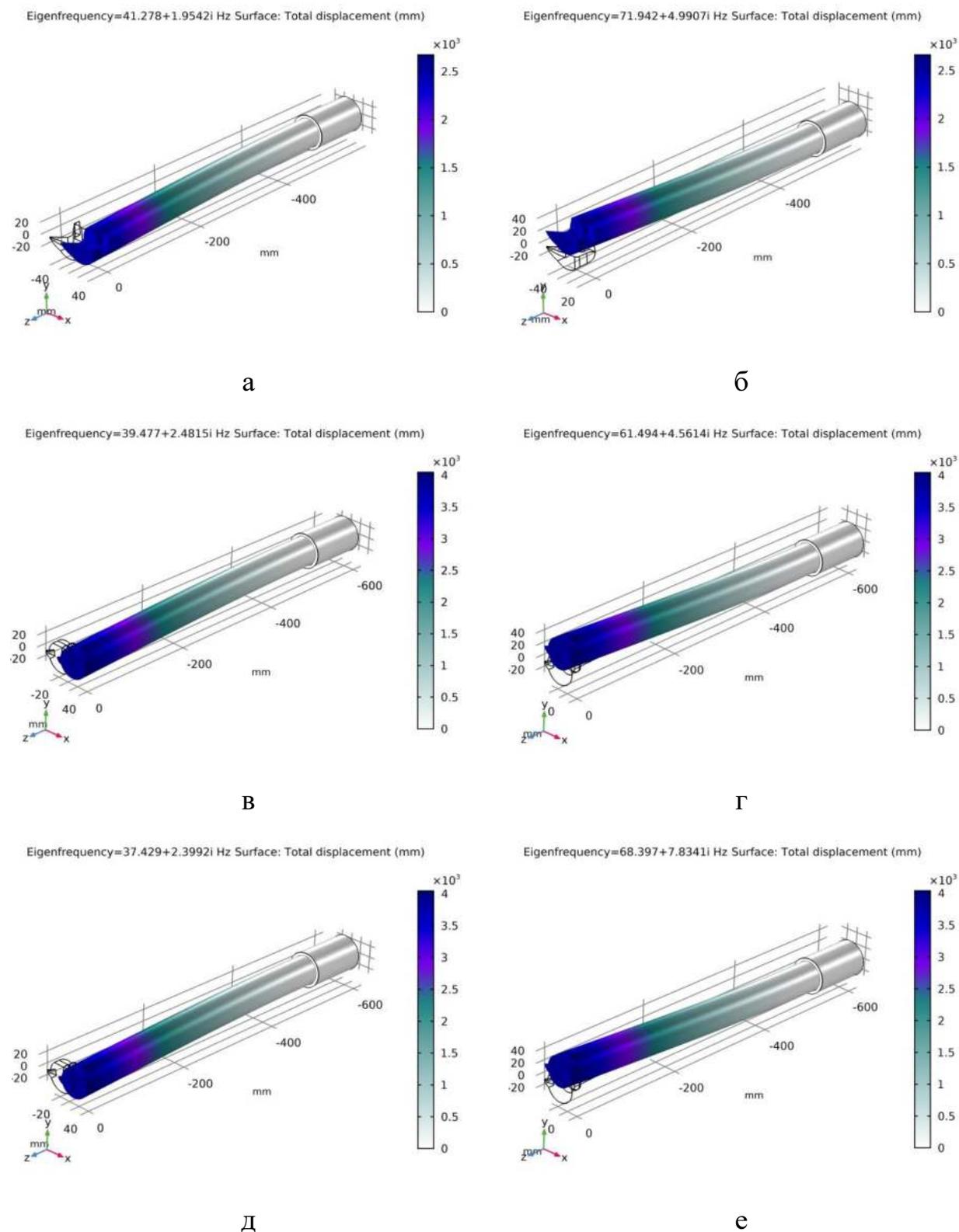


Рисунок 2.19 – Собственные затухающие колебания стандартной и антивибрационной расточной оправки при 10 вылетах, где: а, б – первая собственная мода; в, г – вторая собственная мода

Для разработанной антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом, наибольший эффект демпфирования наблюдается при одном вылете

и двух разных степеней предварительного напряжённо-деформированного состояния: при вылете 0,5 м и степени затяжки 60 Н · м и при вылете 0,5 м и степени затяжки 90 Н · м.

Таблица 2.10 – Собственные моды стандартной оправки и антивибрационной расточной оправки при разной степени затяжки в диапазоне от 60 до 90 Н · м

Стандартной оправки				
Вылет l , м	Моды	Частота колебаний, Гц	Коэффициент демпфирования	Добротность
0.2	1. x	83,185+1,3801i	0,016589	30,141
	2. y	128,03+5,3326i	0,041617	12,014
0.3	1. x	57,415+2,5468i	0,044314	11,283
	2. y	89,211+4,7874i	0,053587	6
0.4	1. x	53,093+2,4979i	0,046995	10,639
	2. y	91,217+6,3512i	0,069460	7,2
0.5	1. x	41,178+1,9542i	0,047290	10,573
	2. y	71,942+4,9907i	0,069206	7,2248
Антивибрационная оправка со степенью затяжки 60 Н · м				
Вылет l , м	Моды	Чистота колебаний, Гц	Коэффициент демпфирования	Добротность
0.2	1. x	79,066+1,4831i	0,018754	26,660
	2. y	121,99+4,9131i	0,040242	12,425
0.3	1. x	54,874+2,4136i	0,043942	11,379
	2. y	85,550+3,9794i	0,046465	10,761
0.4	1. x	53,881+4,2697i	0,078995	6,3295
	2. y	88,900+5,2729i	0,059209	8,4447
0.5	1. x	39,477+2,4815i	0,062734	7,9701
	2. y	61,994+4,5614i	0,073973	6,7592
Антивибрационная оправка со степенью 90 Н · м				
0.2	1. x	79,219+2,0772i	0,026212	19,075
	2. y	126,13+3,9196i	0,031061	16,097
0.3	1. x	53,597+2,7127i	0,050548	9,8915
	2. y	84,904+3,5570i	0,041858	11,945
0.4	1. x	56,063+2,8632i	0,051005	9,8030
	2. y	95,016+6,5354i	0,068620	7,2866
0.5	1. x	37,429+2,3992i	0,063969	7,8163
	2. y	68,397+7,8341i	0,11379	4,3939

Поведение расточной оправки при механической обработке внутренних прецизионных поверхностей можно оценить по амплитудно-частотным характеристикам. Дальнейший динамический анализ антивибрационной

расточной оправки с разжимным конусом осуществлялся при фиксированном вылете 0,5 м и изменяющейся степени затяжки от 60 до 90 Н·м в программной среде системе COMSOL, через решатель Eigenfrequency и Frequency Domain, Modal. Совместно данные решатели позволяют установить амплитудно-частотную характеристику в диапазоне от 10 до 150 Гц антивибрационной расточной оправки при различной степени напряжённо-деформированного состояния.

Силовое воздействие, имитирующее процесс резания, прикладывалось к вершине антивибрационной расточной оправки. При обработке стального участка в направлении оси x прикладывалась сила трения равная $Q_x = 30$ Н, а по направлению y сила резания $P_y = 55$ Н. В том случае, когда ведётся обработка в аустенитной стали, сила трения равна $Q_x = 41$ Н, а сила резания $P_y = 75$ Н. Силовые процессы представлялись в виде гармонического закона, через функцию Harmonic Perturbation. В расчётную трёхмерную модель вводились динамические параметры через диагональную матрицу. Результаты представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Динамические параметры стандартной оправки и антивибрационной расточной оправки при разной степени затяжки в диапазоне от 60 до 90 Н·м

Степень затяжки $M_{кр}, Н \cdot м$	Координаты	Жёсткость $c_i, Н/м$	Сопrotивление $b_i, Н \cdot с/м$			Приведённая масса $m_i, кг$		
		y	x	y	z	x	y	z
0		$1,9 \cdot 10^6$	3136	2629	3212	117	31	306
60		$2,0 \cdot 10^6$	4186	3166	4230	123	44	322
90		$2,4 \cdot 10^6$	4716	4570	4817	146	36	382

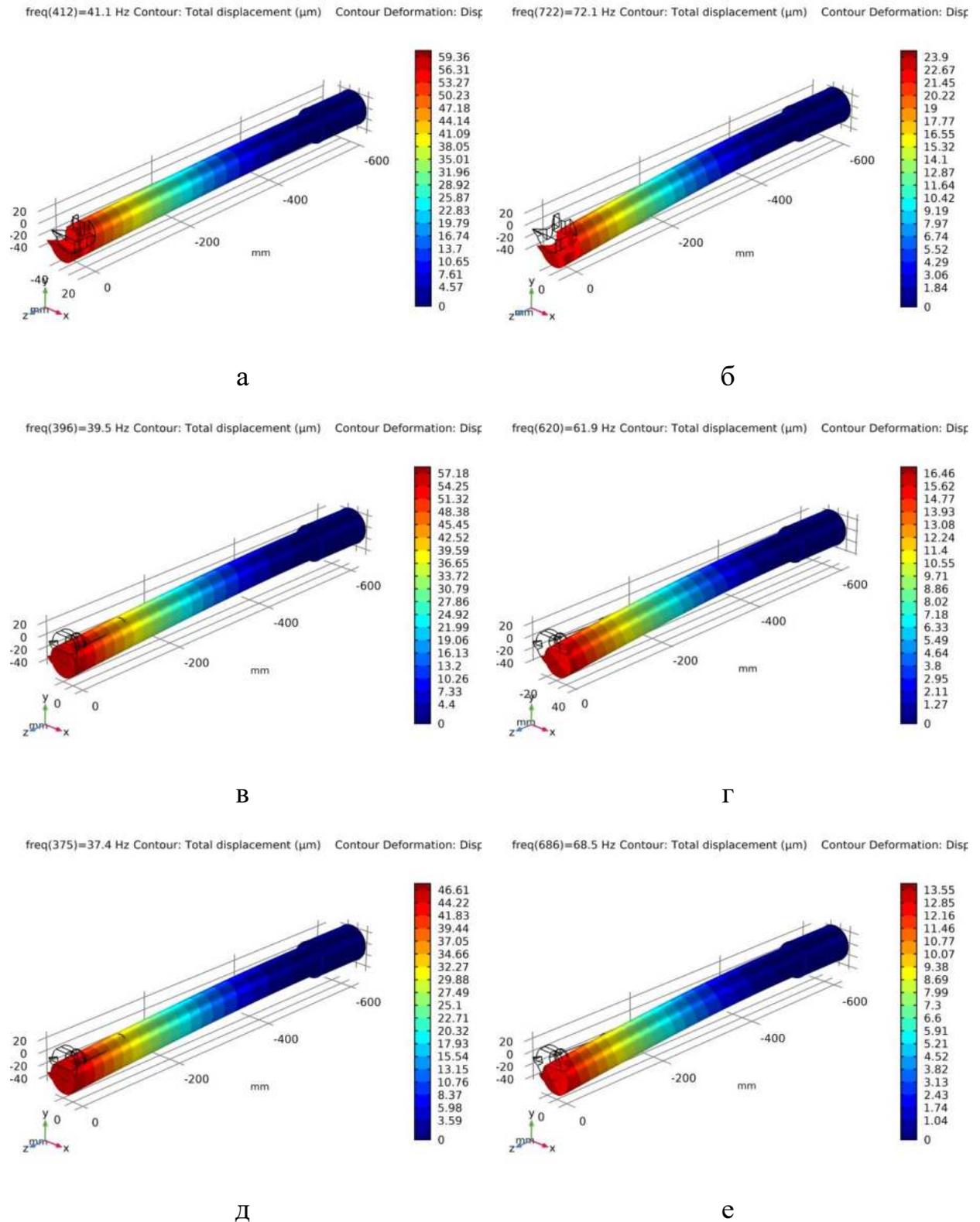


Рисунок 2.20 - Полученные показатели амплитудно-частотных характеристик инструмента аналога а, б и модульной антивибрационной расточной оправки в (X_{60}), г (Y_{60}), д (X_{90}), е (Y_{90}) при обработке углеродистой стали

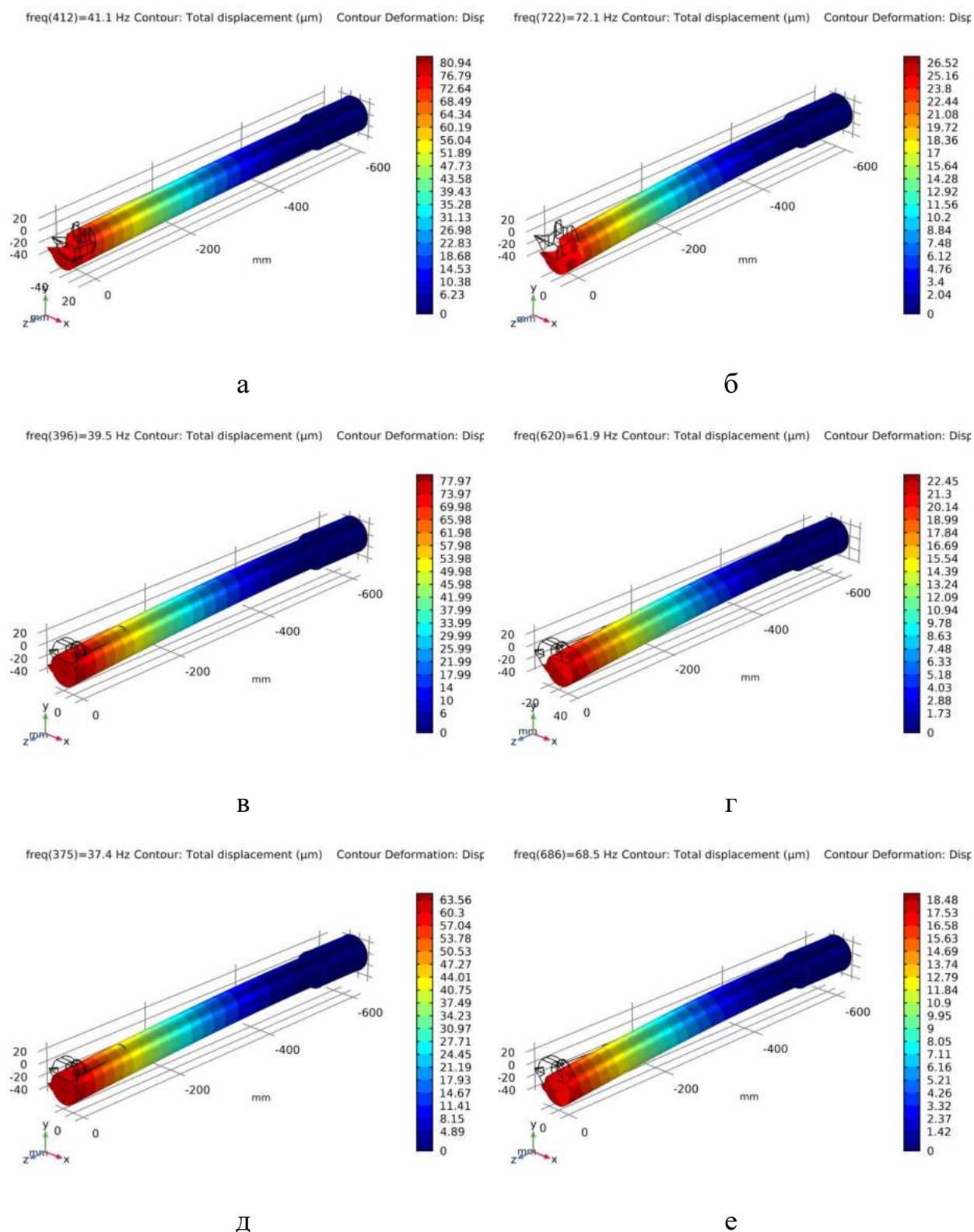


Рисунок 2.21 - Полученные показатели амплитудно-частотных характеристик инструмента аналога а, б и модульной антивибрационной расточной оправки в (X_{60}), г (Y_{60}), д (X_{90}), е (Y_{90}) при обработке нержавеющей аустенитной стали

Фиксация производилась по цилиндрическому основанию расточной оправки с использованием граничного условия Fixed Constraint, реализующего функцию разрезной втулки, которая позволяет закреплять инструмент в револьверную головку станка с ЧПУ. При этом рекомендуемая длина закрепления для расточных инструментов с вылетом более чем 4-х диаметров, должна составлять не менее двух диаметров оправки.

Как можно видеть на представленных изображениях, стандартный расточной инструмент испытывает большие отжатия, чем разработанная расточная оправка с вылетом 0,5 м и степенью затяжки разжимного конуса от 60 Н·м до 90 Н·м. Степень отжатия при силовом возмущении антивибрационной расточной оправки с натягом 90 Н·м снижена в 1,4 раза при растачивании как стального участка, так и участка с аустенитной сталью.

2.6 Предварительные производственные испытания антивибрационной расточной оправки с разжимным конусом

Существует два важнейших фактора для обеспечения требуемой размерной точности и качества обработанной поверхности – это жёсткость закрепления и точная ориентация инструмента относительно высоты оси центров станка. Наибольшую площадь контакта между цилиндрической поверхностью детали «Борштанга» и посадочной поверхностью достигается закреплением расточного инструмента через разрезную втулку. Примером такой втулки может быть редукторная втулка с точностью внутреннего отверстия по Н7 представленная на Рисунке 2.22, а.

Точное позиционирование инструмента относительно высоты оси центров и углу поворота относительно плоскости резания проводится путём равномерного затягивания втулки через болты блока револьверной головы станка, а контроль производится часовым индикатором на магнитной стойке (Рисунок 2.22, б) [120], закреплённого к шпинделю станка (либо к

заготовке, в случае её биения меньше 0,01 мм). Пример такого позиционирования расточного инструмента через индикатор представлен на Рисунке 2.22, б.

Для ориентации расточного инструмента необходимо обеспечить следующую точность позиционирования инструмента: прогиб инструмента не более 0.05 мм; угол поворота инструмента относительно плоскости резания не более 3° ; положение относительно оси центров не более 0,03 мм.



а)

б)

Рисунок 2.22 – Закрепление расточной оправки: а – разрезная втулка; б – точное ориентирование расточной оправки с помощью индикатор на магнитной стойке

Дополнительно на расточные оправки прилагаются следующие требования: шероховатость сопрягаемых поверхностей оправки и втулки не более 1 мкм для обеспечения жёсткого контакта инструмента в приспособлении; длина закрепления должна составлять не менее 2 диаметров оправки.

Производственных испытаний проводились на предприятии ООО «НПП «Орион» на горизонтальном обрабатывающем центре Hyundai WIA L700LM (Приложение Б) с использованием расточной оправки, находящейся в напряжённо-деформированном состоянии.

Растачивание отверстия в образце (Рисунок 2.23), состоящего из сваренных между собой втулок из Стали 45 ГОСТ 1050-2013 и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-2018, осуществлялось с различными режущими пластинами и соответствующими для них режимами механической обработки:

– режущая пластина VBMT 110304-ММ 2025, с вращением детали $n_{об} = 650$ об/мин, подачей $S_{рез} = 0,08$ мм/об и глубиной резания $t_{рез} = 0,3$ мм;

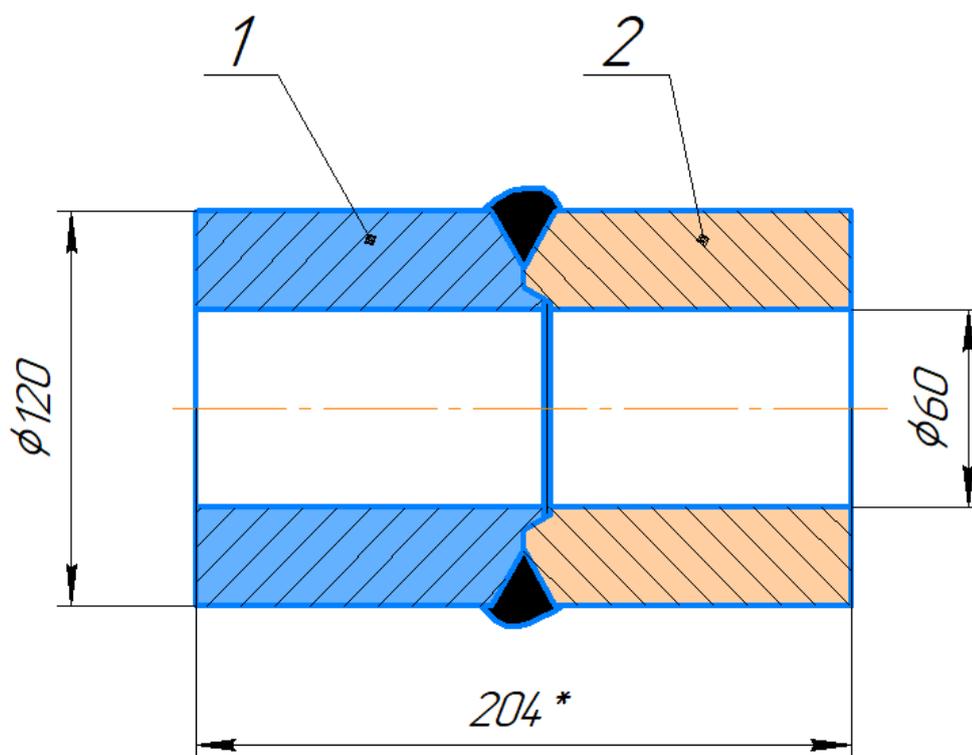


Рисунок 2.23 – Образец для испытания: 1 – Сталь 45 ГОСТ 1050-2013;

2 – нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-2018

– режущая пластина VBMT 110304-PF 4315, с вращением детали $n_{об} = 880$ об/мин, подачей $S_{рез} = 0,06$ мм/об и глубиной резания $t_{рез} = 0,5$ мм.

Предварительные испытания показали, что работа расточного инструмента с обеспечением требуемой шероховатости на чистовых переходах операции растачивания в пределах $Ra = 1$ мкм возможна при максимальном вылете инструмента равным 10 диаметрам оправки с $M_{кр} = 90$ Н · м, обеспечивающее необходимое напряжённно-деформированное состояние в расточной оправке.

2.7 Выводы по второй главе

1. Проведён аналитический обзор и обоснован выбор материала для изготовления державки антивибрационной оправки, основывающийся на прочностных характеристиках и демпфирующих свойствах рассмотренных видов металлов.

2. Обоснован выбор внутреннего конструкционного демпфирования элемента расточной оправки, представляющего в виде разжимного конуса с регулируемой степенью напряжённно-деформированного состояния, которое оказывает существенное влияние на эффект поглощения энергии вибраций, возникающих при растачивании изделий из разнородных материалов в технологическом процессе.

3. Разработан способ технологического обеспечения макро- и микрогеометрических параметров внутренних прецизионных поверхностей при растачивании отверстий в деталях, сваренных из разнородных сталей, посредством использования специального инструмента, обладающего диссипативными свойствами.

4. Изготовлена расточная оправка, находящаяся в определённом фиксированном напряжённно-деформированном состоянии, для подавления возникающих возмущений в процессе растачивания разнородных обрабатываемых сталей и обеспечения качественных показателей обрабатываемого отверстия (Приложение В).

5. Установлено влияние вылета и различной степени напряжённо-деформированного состояния на динамические параметры разработанной антивибрационной расточной оправки и стандартного инструмента.

6. Определены и обоснованы значения степени затяжки, влияющей на напряжённо-деформированное состояние расточной оправки, которые будут использоваться для дальнейших экспериментальных исследований и расчётов.

ГЛАВА 3 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛИ ТИПА «ВТУЛКА» С УЧЁТОМ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОЙ ОПРАВКИ

Шероховатость обработанной поверхности и точность формы во многом зависят от динамических характеристик автоколебательного процесса при изготовлении изделий на станках с ЧПУ. Для предварительной оценки влияния автоколебательного процесса на макро- и микрогеометрические показатели поверхности необходимо создать математическую модель.

При разработке имитационной модели, основной гипотезой возникновения автоколебательного процесса и его перехода в неустойчивое состояние в замкнутой технологической системе станка ЧПУ, будет считаться запаздывание силы резания P по отношению к силе трения Q [113].

В технологическом процессе изготовления детали типа «втулка», причина запаздывания объясняется различными физико-механическими свойствами элементов обрабатываемой заготовки, сваренной из разнородных сталей. При механической обработке такой заготовки, режущий инструмент переходит из участка с конструкционной сталью в участок изделия из нержавеющей стали, что сопровождается изменением физико-механических свойств. В результате того, что нержавеющая сталь обладает более высокой пластичностью по сравнению с конструкционной сталью, это приводит к высокой степени упрочнения срезаемого металла при пластической деформации в 2 раза (с 600 до 1200 Н/мм²) [82]. Поэтому, чем пластичнее металл, тем больше необходимо затратить силовой нагрузки со стороны лезвийной обработки для снятия одного и того же объёма металла. Следовательно, высокая способность к упрочнению металла в процессе деформации при механической обработке вызывает возрастание силы резания и трения, раскачивая замкнутую технологическую систему станка с ЧПУ.

Достичь нужного эффекта, по снижению амплитуды автоколебательного процесса, позволит антивибрационная расточная оправка, находящаяся в напряжённо-деформированном состоянии, которая вводится в математическую модель через динамические параметры по нормальному и касательному контуру замкнутой системы.

Разрабатываемая модель позволит спрогнозировать устойчивость процесса растачивания разнородной конструкции и в последующем оценить качественные показатели обработанной внутренней поверхности.

На основании вышеописанной концепции, строится математическая модель операции растачивания изделий из разнородных металлов на станке с ЧПУ. Для реализации поставленной задачи требуется:

- составить уравнения движения для парциальной подсистемы «инструмент» в нормальном и касательном контуре к поверхности заготовки;
- составить уравнение запаздывания силы резания по отношению к силе трения, связывающее нормальный и касательный контур;
- разработать тумблер, учитывающий механические особенности участков разнородной конструкции, переходные процессы и динамические параметры замкнутой системы;
- составить передаточные функции линейных дифференциальных уравнений;
- установить влияние технологических режимов обработки антивибрационным инструментом на устойчивость процесса растачивания.

3.1 Составление уравнения движения для частичной подсистемы «инструмент» в нормальном и касательном контуре к поверхности заготовки

Проведённые исследования в работах [15, 18, 38, 113, 115] показывают, что из всего многообразия звеньев, входящих в конструкцию станка, наиболее неустойчивым считается подсистема «инструмент». Тогда модель динамической системы по растачиванию изделий из разнородных металлов можно представить в следующем виде (Рисунок 3.1).

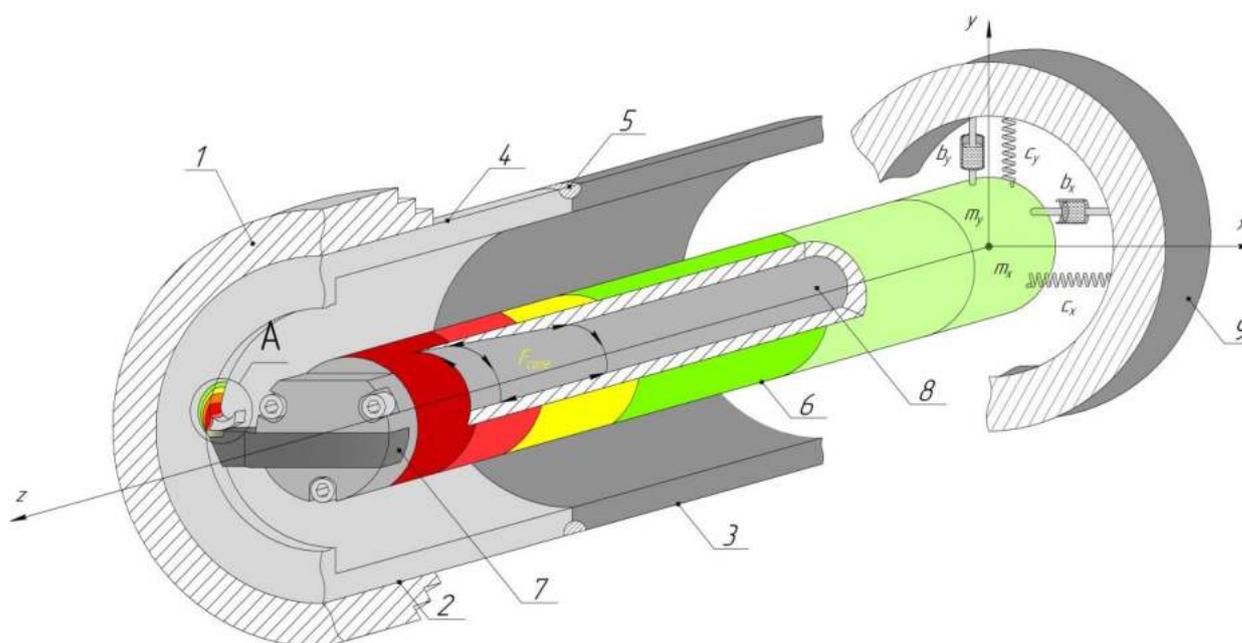


Рисунок 3.1 – Схема динамической системы механической обработки при растачивании разнородной сварной конструкции, где: 1 – шпиндель; 2 – сварная разнородная заготовка; 3 – участок со сталью 45; 4 – участок с нержавеющей аустенитной сталью 12Х18Н10Т; 5 – участок электродуговой сварки; 6 – расточной инструмент; 7 – режущий инструмент; 8 – разжимной конус; 9 – крепление расточного инструмента в револьверной головке; А – процесс стружкообразования

В соответствии с принятой моделью, для двух контуров, нормального и касательного, составляется уравнение движения. Общий подход к составлению дифференциальных уравнений движения рассматриваемой динамической системы с двумя степенями свободы состоит в следующем [61]:

1. Составляется общее выражение для потенциальной энергии Π всей системы:

$$\Pi_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^i c_i q_i^2, \quad (3.1)$$

где c_i – коэффициенты жёсткости упругих элементов, q – обобщённые координаты.

2. Составляется общее выражение для кинетической энергии T всей системы:

$$T_i = \frac{1}{2} m(q_i^2) + \frac{1}{2} J(q_i^2), \quad (3.2)$$

где m – приведённая масса, J – массовый момент инерции.

3. Составляется выражение рассеивания энергии всей системы, через диссипативную функцию Рэлея:

$$\Phi_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^i b_i q_i^2, \quad (3.3)$$

где b_i – коэффициент линеаризованного сопротивления.

4. Составляется выражение для работы, которые произведут все приложенные к различным точкам исследуемой системы силы, если положение системы изменится в результате того, что все обобщённые координаты получат произвольные малые приращения. Выражение, описывающее обобщённые силы, имеет вид:

$$\delta W = Q_1 \delta q_1 + Q_2 \delta q_2 + \dots + Q_i \delta q_i, \quad (3.4)$$

где Q_i – некоторая функция от обобщённых координат, называемая обобщённой силой.

5. Составляется дифференциальное уравнение движения системы, которое представляется в виде уравнения Лагранжа 2-го рода:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i. \quad (3.5)$$

Составим уравнения для двух контуров антивибрационной оправки с регулируемым напряжённо-деформированным состоянием. Соответственно выражение потенциальной энергии примет вид:

$$\Pi = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 c_i q_i^2 = \frac{1}{2} (c_x x^2 + c_y y^2) + c_x x_{\Delta} x + c_y y_{\Delta} y, \quad (3.6)$$

где c_x и c_y – коэффициенты жёсткости в контурах x и y , x_{Δ} и y_{Δ} – приращения по соответствующих координатам.

Выражение кинетической энергии запишем в предположении отсутствия поворота относительно оси (момента инерции), перпендикулярной плоскости чертежа:

$$T_i = \frac{1}{2} m (q_i^2) = \frac{1}{2} m (x^2 + y^2), \quad (3.7)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) = m_x \frac{d^2 x}{dt^2}, \quad (3.8)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) = m_y \frac{d^2 y}{dt^2}, \quad (3.9)$$

где x, y, \dot{x}, \dot{y} – обобщённые координаты и скорости рассматриваемой системы расточной оправки.

Демпфирующие свойства системы будем отображать через диссипативную функцию Рэлея в следующем виде:

$$\Phi_i = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^i b_i q_i^2 = \frac{1}{2} (b_x \dot{x}^2 + b_y \dot{y}^2), \quad (3.10)$$

где b_x и b_y – коэффициенты линейризованного сопротивления в контурах x и y .

Обобщённые силы Q_x и Q_y по осям x и y :

$$Q_x = f P_y, \quad (3.11)$$

$$Q_y = P_y, \quad (3.12)$$

где f – коэффициент трения, P_y – сила резания.

Подставив полученные выражения с 3.6 по 3.12 в уравнение Лагранжа 2-го рода 3.5 и произведя математические преобразования, получим:

$$\begin{cases} m_x \frac{d^2 x}{dt^2} + b_x \frac{dx}{dt} + c_x = Q_T & (3.13) \\ m_y \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + c_y = P_y & (3.14) \end{cases},$$

где $Q_T = fP_y$ – сила трения при контакте стружки с резцом.

По окончании всех преобразований, для рассматриваемой схемы динамической системы по растачиванию изделий из разнородных металлов, составлена система нелинейных дифференциальных уравнений, состоящая из двух колебательных звеньев второго порядка.

3.2 Составление уравнения запаздывания силы резания по отношению к силе трения, связывающее нормальный и касательный контур

Входящие в систему уравнений 3.13 и 3.14 силы резания и трения не соединены между собой математически, следовательно, не отражается принципиально важное взаимодействие между подсистемами в направлении контуров x и y , приводящее к раскачиванию замкнутой системы. В связи, с чем для отображения замкнутости потенциально автоколебательной системы требуется математически описать процесса стружкообразования [14, 58, 62]. Прежде чем переходить к математическому описанию взаимосвязи между системой уравнений, необходимо разобраться в физических процессах сопровождающих стружкообразование.

Процесс стружкообразования при растачивании отверстий состоит из трёх последовательных протекающих фазы: первичной упругой деформации; пластической деформации; активной пластической деформации снимаемого припуска [17, 65, 113]. При контакте передней части режущего инструмента расточной оправки 2 с обрабатываемой металлической заготовкой 1 возникают первые очаги зарождения упругопластической деформации в срезаемом припуске, т.е. образуется стружка 3. В результате такого взаимодействия,

инструмент испытывает силовые нагрузки со стороны силы трения Q_T по координате x и силы резания P_y по координате y . Обозначив условные границы внутренних поверхностей AD и BC (Рисунок 3.2).

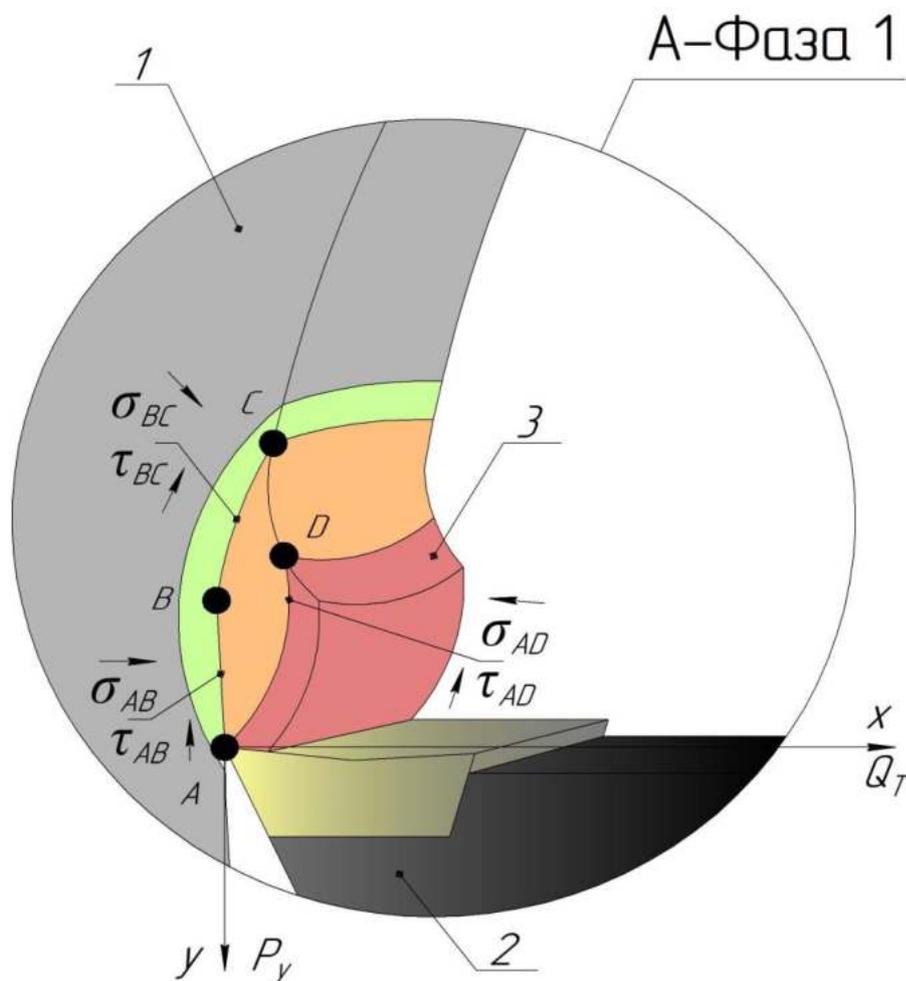


Рисунок 3.2 – Модель процесса первичного формирования стружки при растачивании,
 где: 1 – заготовка; 2 – режущий инструмента расточной оправки;
 3 – образующаяся стружка

К ним в свою очередь будут наложены касательные напряжения $\tau_{AD}-\tau_{BC}$ и сжимающие напряжения $\sigma_{AD}-\sigma_{BC}$. К поверхности AB приложены растягивающие σ_{AB} напряжения и касательные напряжения τ_{AB} . Образующаяся поверхность CD свободна напряжений. Передавая режущему инструменту расточной оправки 2 в плоскости y приращение y_A , приложенные касательные τ_{AB} напряжения на поверхности AB мгновенно достигают предела прочности, образуя в этом направлении микротрещину. Дальнейшее перемещение вызывает раскрытие трещины, что зарождает новые поверхности, свободные от приложенных в прошлом напряжений τ_{AB} и σ_{AB} . Вследствие чего создаются все

условия для последующего ускорения деформации в области развитой зоны ACD по первичной β' и условной β'' границе сдвига, вытягивая круглые зерна металла в эллиптическую форму под действием преобладающих сдвиговых деформаций (Рисунок 3.3).

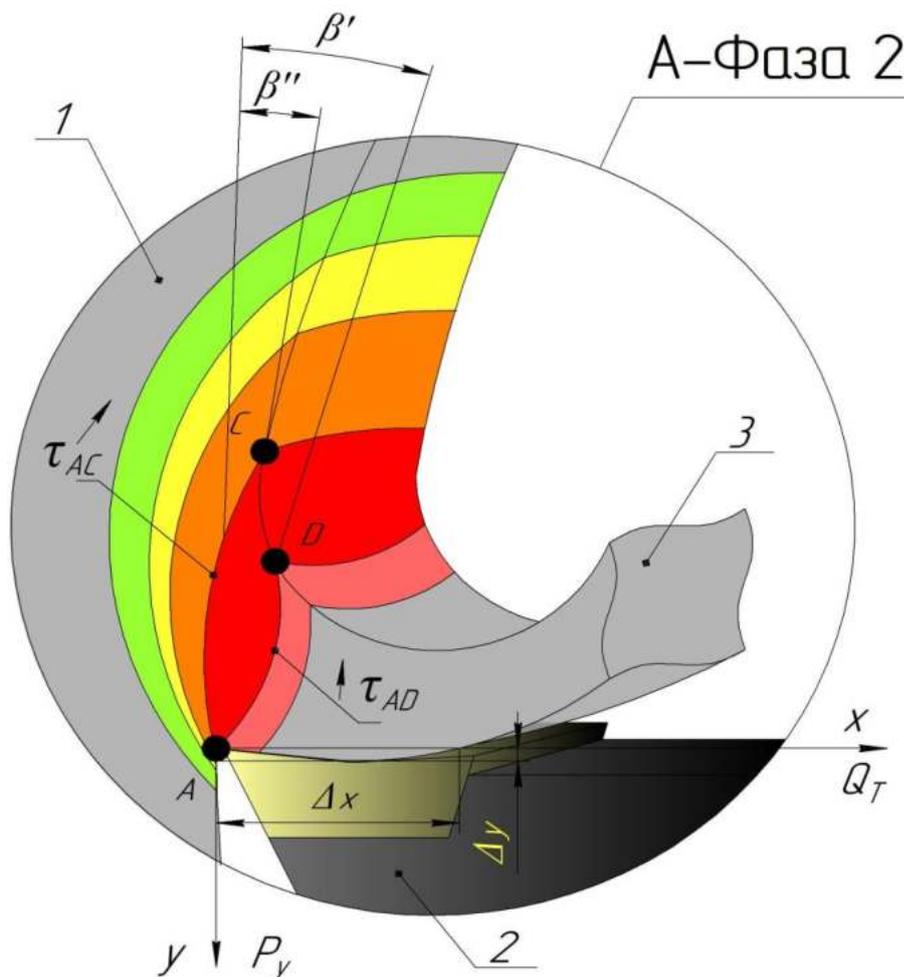


Рисунок 3.3 – Модель процесса пластической деформации срезаемого слоя с развитой зоной сдвига ACD при растачивании, где: β' и β'' – первичная и условная граница сдвига

Следовательно, это приводит к отделению деформированного слоя от обрабатываемой поверхности, в конечном счёте, придавая ему форму сливной стружки. При такой постановке сжимающие напряжения $\sigma_{BC}-\sigma_{AD}$ практически не воздействуют на деформируемый слой, а преобладающими остаются касательные $\tau_{AC}-\tau_{AD}$, придавая стружке пилообразную форму.

При переходе процесса стружкообразования в активную фазу под воздействием рабочих процессов (Рисунок 3.3), происходит смещение

инструмента от заданного положения в двух направлениях x_Δ и y_Δ , вызывая запаздывание в изменении действующих силовых воздействий Q_T и P_y , поддерживая, таким образом, автоколебания в замкнутой системе.

Описанный процесс механической обработки, обладающий несколькими фазами образования срезаемого слоя, математически можно описать с учётом упрощений [18, 38, 17, 113] не как дискретный процесс, а как непрерывный за счёт аппроксимации [113].

Получим, что значения пути длин запаздывания L_P и L_Q по направлению координат x и y , являются величинами постоянными, зависящими от вида обрабатываемого металла и режимов механической обработки. Тогда получим следующее.

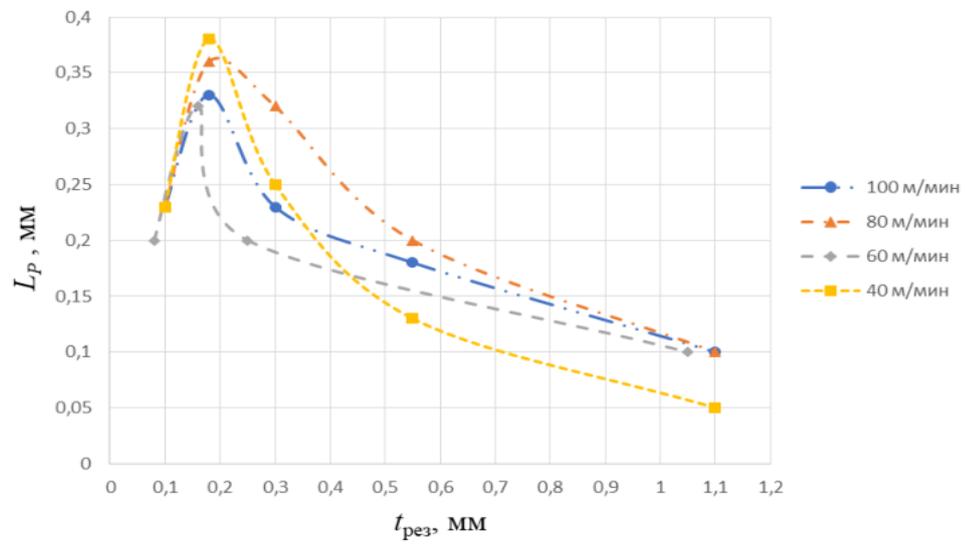
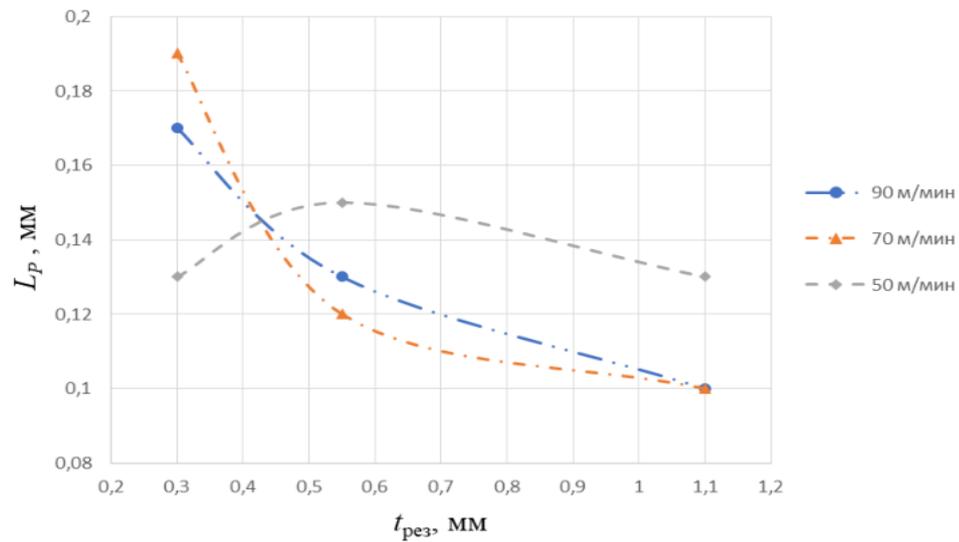
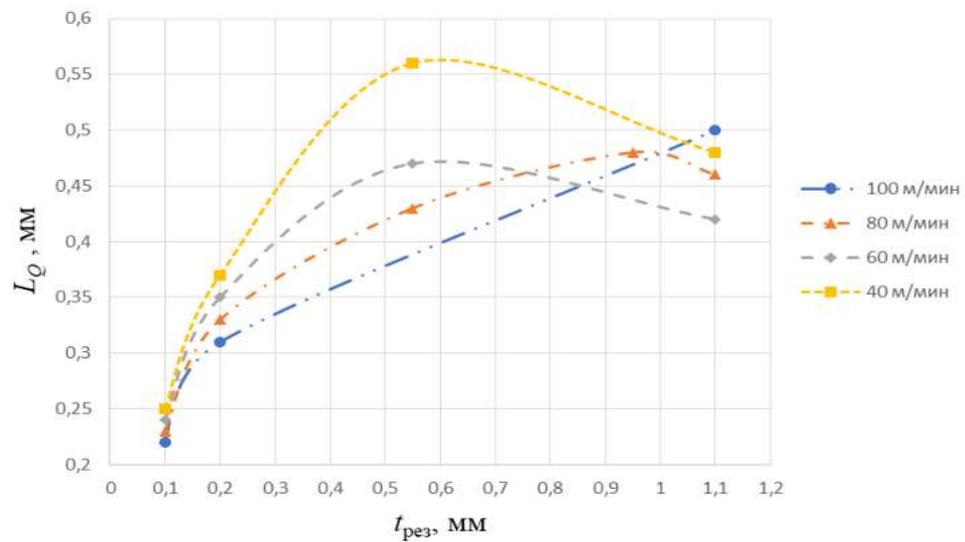
Обозначим скорость обработки через параметр $V_{\text{рез}}$ и, учитывая показатели длин запаздывания L_P , L_Q [113], получаем интегральные уравнения:

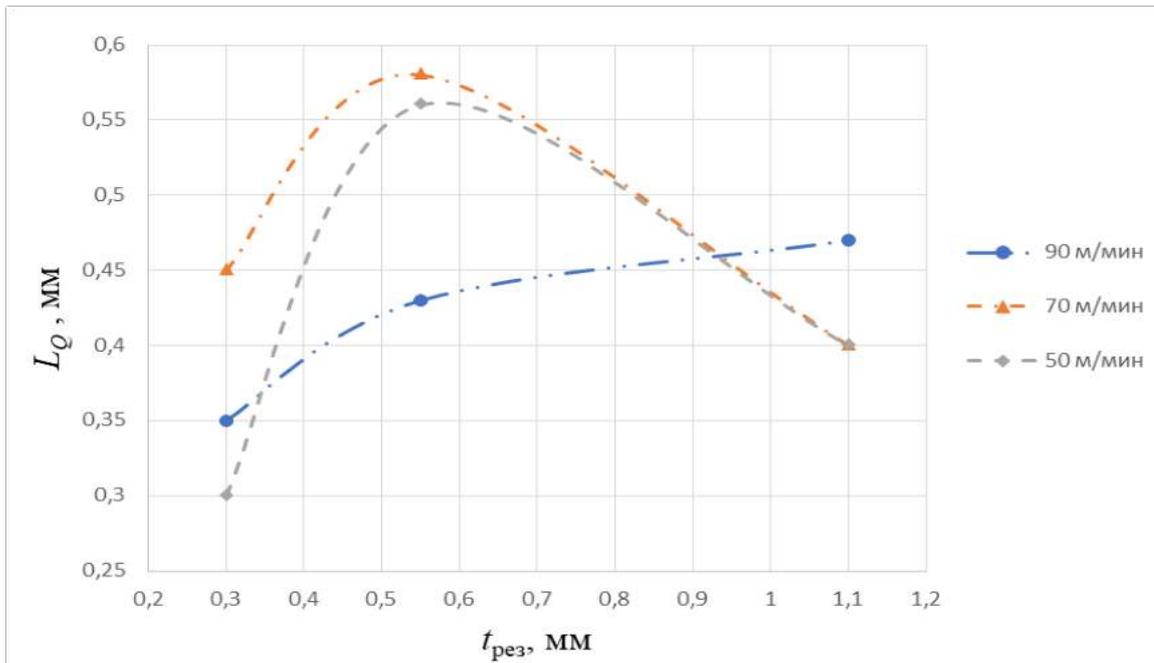
$$L_P = \int_{t=0}^{\tau_P} \left(V_{\text{рез}} + \Delta \frac{dy}{dt} \right) dt = V_{\text{рез}} \tau_P + \int_{t=0}^{\tau_P} \Delta \frac{dy}{dt} dt, \quad (3.15)$$

$$L_Q = \int_{t=0}^{\tau_Q} \left(V_{\text{рез}} + \Delta \frac{dy}{dt} + \varepsilon \Delta \frac{dx}{dt} \right) dt = V_{\text{рез}} \tau_Q + \int_{t=0}^{\tau_Q} \left(\Delta \frac{dy}{dt} + \varepsilon \Delta \frac{dx}{dt} \right) dt, \quad (3.16)$$

где τ_P – время запаздывания по направлению действия силы P_y от x ; τ_Q – время запаздывания по направлению действия силы Q_T от P_y ; $\Delta \frac{dy}{dt}$ – изменение скорости в контуре y ; $\Delta \frac{dx}{dt}$ – изменение скорости в контуре x ; t – время; ε – коэффициент усадки стружки.

Данные по значениям длин запаздывания L_P и L_Q для нержавеющей аустенитной стали 12Х18Н10Т и конструкционной сталей 45 представлены в виде графических зависимостей от глубины резания, для широкого спектра скоростей механической обработки (Рисунке 3.4).

а) длина запаздывания L_P конструкционной стали 45б) длина запаздывания L_P нержавеющей аустенитной стали 12X18H10Tв) длина запаздывания L_Q конструкционной стали 45



г) длина запаздывания L_Q нержавеющей стали 12Х18Н10Т

Рисунок 3.4 – Графики зависимостей длин запаздывания силовых процессов от глубины резания, при различных скоростях механической обработки

Входящую в уравнение 3.14 силу P_y можно представить в статическом виде, зависящей от глубины резания $t_{рез}$, подачи $S_{рез}$ и скорости обработки $V_{рез}$:

$$P_y = C_p \cdot t_{рез}^i \cdot S_{рез}^o \cdot V_{рез}^p \cdot K_{рез}, \quad (3.17)$$

$$K_{рез} = KM_{рез} \cdot K\varphi_{рез} \cdot K\gamma_{рез} \cdot K\lambda_{рез} \cdot Kr_{рез} \quad (3.18)$$

Степенные показатели i , o , p , поправочный коэффициент $K_{рез}$ и эмпирический коэффициент C_p , учитывающие геометрию твёрдосплавной пластины, вид операции, обрабатываемый материал и др. выбираются из данных, представленных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Значения степенных показателей i , o , p , поправочного коэффициент $K_{рез}$ и эмпирического коэффициент C_p , при механической обработке различных нержавеющей и конструкционных сталей [114, 115, 116,]]

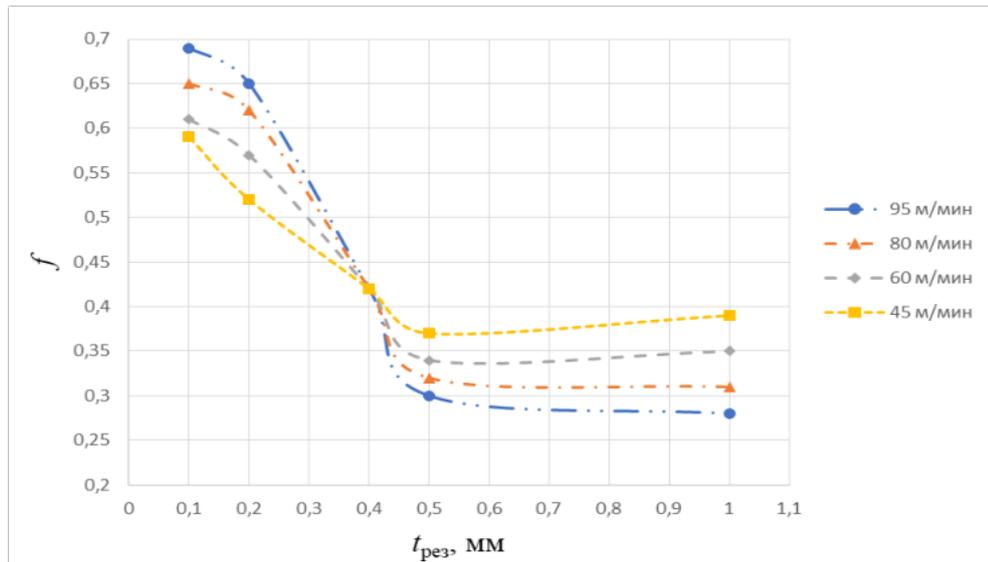
Обрабатываемый материал	C_p	i	o	p
Сталь конструкционная углеродистая и легированная, $\sigma_B = 750$ МПа	300	1,00	0,75	-0,15
Коррозионностойкая сталь	204	1,00	0,75	0
$KM_{рез}$ – механические свойства обрабатываемого материала				
Сталь 45	0,85			
Сталь 12X18H10T	0,79			
$K\varphi_{рез}$ - главный угол в плане φ , °	30	45	60	90
Значение $K\varphi_{рез}$	1,08	1,00	0,94	0,89
$K\gamma_{рез}$ - передний угол γ , °	20	0	-10	-20
Значение $K\gamma_{рез}$	0,90	1,10	1,20	1,30
$K\lambda_{рез}$ – угол наклона главной режущей кромки в плане λ , °	-5	5	10	15
Значение $K\lambda_{рез}$	1			
$Kr_{рез}$ – радиус режущей кромки, мм	0,5		1	
Значение $Kr_{рез}$	0,87		0,93	

В свою очередь сила трения, входящая в уравнение 3.13, описывается известной формулой 3.11. Изменения коэффициента трения, необходимого для расчёта силы трения при механической обработке, представлено в виде графиков на Рисунке 3.5.

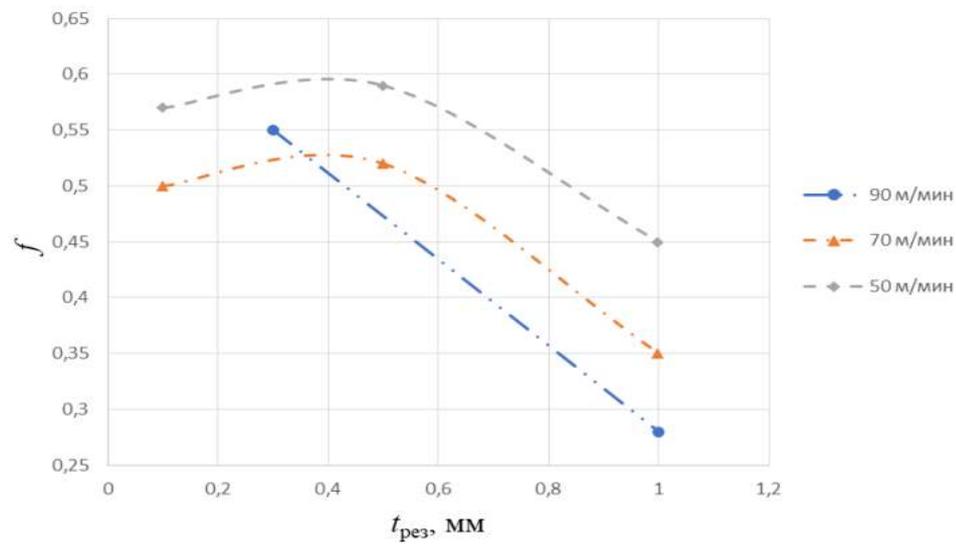
Формулы 3.11 и 3.17 имеют эмпирический вид. Однако силы резания и трения являются функциями времени, следовательно:

$$P_{\Delta}(t) = P_y x(t), \quad (3.19)$$

$$Q_{\Delta}(t) = Q_T(t). \quad (3.20)$$



а) конструкционная сталь 45



б) нержавеющая аустенитная сталь

Рисунок 3.5 – Графики зависимостей коэффициентов трения от глубины резания, при различных скоростях механической обработки

Учитывая формулы 3.18 и 3.19, уравнение запаздывания между силой P_y и координатой x , а также P_y от Q_T в произвольный момент времени будет иметь вид:

$$P_{\Delta}(t + \tau_P) = -P_y \cdot x(t) \equiv P_{\Delta}(t), \quad (3.21)$$

$$Q_{\Delta}(t + \tau_Q) = Q_T(t) \equiv Q_{\Delta}(t). \quad (3.22)$$

Разложив каждую функцию вида $P_{\Delta} \cdot (t + \tau_P)$ и $Q_{\Delta} \cdot (t + \tau_Q)$ в ряд Тейлора, получим уравнения для расчёта времени запаздывания τ_P , силы резания P_{Δ} и τ_Q силы трения Q_{Δ} [113, 114]:

$$\tau_P = \frac{P_{\Delta}(t) - P_y(t)}{\dot{P}_y(t)}, \quad (3.23)$$

$$\tau_Q = \frac{Q_{\Delta}(t) - Q_T(t)}{\dot{Q}_T(t)}. \quad (3.24)$$

Учитывая формулы (3.15), (3.16) и (3.22), а также (3.23), после преобразования получим:

$$T_P \dot{P}_y + \left(1 + \frac{dy}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) P_y + P_y x \left(1 + \frac{dy}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) = 0, \quad (3.25)$$

$$T_Q \dot{Q}_T + \left(1 + \frac{dy}{dt} + \varepsilon \frac{dx}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) Q_T - P_y f \left(1 + \frac{dy}{dt} + \varepsilon \frac{dx}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) = 0. \quad (3.26)$$

Объединив дифференциальные уравнения движения 3.13, 3.14 и формулы процесса запаздывания силы резания по отношению к силе трения 3.24, 3.25 получим:

$$\left\{ \begin{array}{l} m_x \frac{d^2 x}{dt^2} + b_x \frac{dx}{dt} + c_x = Q_T \\ m_y \frac{d^2 y}{dt^2} + b_y \frac{dy}{dt} + c_y = P_y \\ T_P \dot{P}_y + \left(1 + \frac{dy}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) P_y + P_y x \left(1 + \frac{dy}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) = 0 \\ T_Q \dot{Q}_T + \left(1 + \frac{dy}{dt} + \varepsilon \frac{dx}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) Q_T - P_y f \left(1 + \frac{dy}{dt} + \varepsilon \frac{dx}{dt} \frac{1}{V_{\text{рез}}}\right) = 0 \end{array} \right. \quad (3.27)$$

Исходная система нелинейных дифференциальных уравнений 3.26 для последующего решения требует преобразований, т.е. приведения к безразмерной форме по методике, изложенной в работе [113]. Применив методику, связанную с аппроксимацией, получим следующую систему

линейных дифференциальных уравнений, учитывающую процесс стружкообразования:

$$T_{x2}^2 \cdot \ddot{x} + T_{x1} \cdot \dot{x} + x = Q_T \quad (3.28)$$

$$T_{y2}^2 \cdot \ddot{y} + T_{y1} \cdot \dot{y} + y = P_y \quad (3.29)$$

$$T_P \dot{P}_y + P_y = -k_x \cdot x - T_{ky1} \cdot \dot{y} \quad (3.30)$$

$$T_Q \dot{Q}_T + Q_T = P_y - T_{kx} \cdot x - T_{ky2} \cdot \dot{y} \quad (3.31)$$

где $T_{x2} = \left(\sqrt{\frac{c_x}{m_x}}\right)^{-1}$ и $T_{y2} = \left(\sqrt{\frac{c_y}{m_y}}\right)^{-1}$ – постоянные времени; $T_{x1} = \frac{b_x}{c_x}$ и

$T_{y1} = \frac{b_y}{c_y}$ – постоянные времени демпфирования; $T_P = \frac{L_P}{V_{рез}}$ и

$T_Q = \frac{L_Q}{V_{рез}}$ – постоянные составляющие сил трения и силы резания;

k_x – коэффициент передачи; T_{kx} , T_{ky1} и T_{ky2} – постоянные времени демпфирования от изменения скорости резания.

Представленная система уравнений описывает поведение двухконтурной математической модели, где процессы трения между подсистемами «инструмент» и «заготовка» заложены в виде статической характеристики трения по закону Амонтона-Кулона.

Входящий коэффициент передачи замкнутого контура в математическую модель процесса растачивания разнородной сварной конструкции имеет следующий вид записи:

$$k_x = d_x \cdot \left(\frac{V_{рез}}{(L_P + L_Q) \cdot \omega_x} + \frac{(L_P + L_Q) \cdot \omega_x}{V_{рез}} \right), \quad (3.32)$$

где $\omega_x = \sqrt{\frac{c_x}{m_x}}$ – угловая частота в контуре x , $d_x = \frac{b_x}{2 \cdot m_x}$ – коэффициент

рассеивания энергии в контуре x .

Демпфирующие величины T_{ky1} , T_{ky2} , T_{kx} можно представить в следующем виде:

$$T_{ky1} = \frac{A_x P_y T_P \gamma}{V_{\text{рез}} c_y \sqrt{T_P^2 \gamma^2 + 1}} \Omega_1, \quad (3.33)$$

$$T_{ky2} = \frac{A_x P_y T_P \gamma}{V_{\text{рез}} c_y \sqrt{(T_P^2 \gamma^2 + 1)(T_Q^2 \gamma^2 + 1)}} \Omega_2, \quad (3.34)$$

$$T_{kx} = \frac{A_x P_y f \varepsilon T_Q \gamma}{V_{\text{рез}} c_x \sqrt{(T_P^2 \gamma^2 + 1)(T_Q^2 \gamma^2 + 1)}} \Omega_2, \quad (3.35)$$

где A_x – амплитуда колебаний, γ – угловая частота замкнутой системы, Ω_1 и Ω_2 – сдвиг фаз между переменными.

3.3 Учёт напряжённо-деформированного состояния антивибрационной расточной оправки и разнородности обрабатываемой заготовки в математической модели

Для того чтобы снизить интенсивность автоколебательного процесса при растачивании внутренних поверхностей изделия, сваренного из разнородных металлов, в конструкцию расточной оправки предлагается вводить разжимной конус, регулировка степени натяжения которого осуществляется через регулировочную гайку.

Как показали проведённые динамические исследования во второй главе и компьютерное моделирование в программной среде COMSOL Multiphysics, изменение степени затяжки разжимного конуса влияет на динамические параметры созданного антивибрационного инструмента. Речь идёт о таких параметрах как демпфирование, коэффициент жёсткости и приведённая масса. Данные показатели входят в предлагаемую двухконтурную математическую модель (3.27 - 3.28), описывающую процесс растачивания разнородной сварной заготовки, как постоянные времени.

Следовательно, оценить эффект подавления амплитуды автоколебаний посредством формирования предварительного напряжённо-деформированного состояния антивибрационной расточной оправки в математической модели возможно посредством тумблера (переключателя).

Тумблер позволит изменять не только динамические параметры замкнутой системы в зависимости от выбранной степени затяжки разжимного конуса в диапазоне от 60 до 90 Н·м, но и учесть особенности механической обработки на участке с конструкционной сталью 45 (T_I), переход границы раздела двух сталей (T_{II}) и вхождение в участок с нержавеющей аустенитной сталью 12Х18Н10Т (T_{III}).

Принципиальная схема работы тумблера на получистовых и чистовом переходах процесса растачивания отверстия в детали, состоящей из разнородных материалов представлена на Рисунке 3.6.

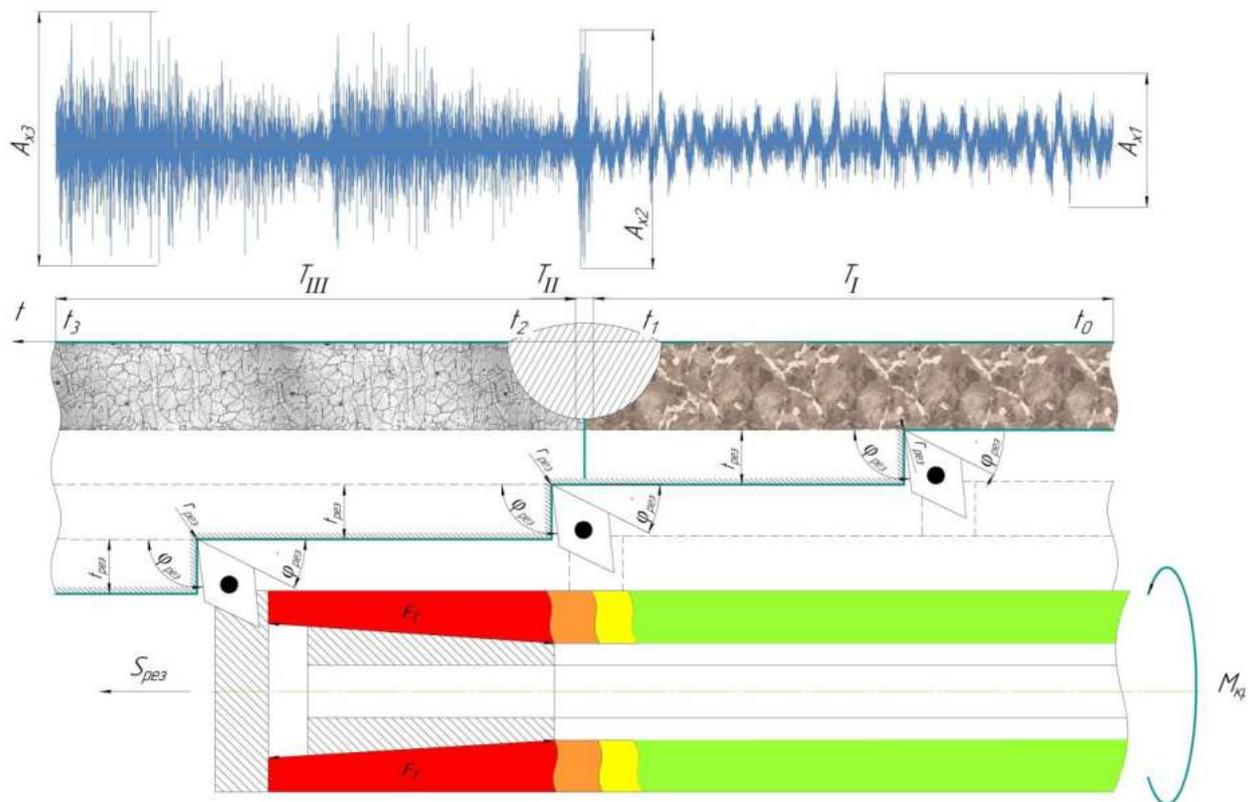


Рисунок 3.6 – Схема работы расточного инструмента на получистовом и чистовом переходе, где: A_{x1} – амплитуда колебаний на 1-м участке; A_{x2} – амплитуда колебаний на границе двух участков; A_{x3} – амплитуда колебаний на 2-м участке; $t_{рез}$ – глубина резания; $r_{рез}$ – радиус резания

В связи, с чем параметры, определяющие поведение обобщённой двухконтурной математической модели (3.27-3.30), необходимо разложить по следующим группам:

- 1 группа – динамические параметры, влияющие на поведение замкнутой двухконтурной технологической системы, и изменяющиеся посредством затяжки разжимного конуса антивибрационной расточной оправки;

- 2 группа – параметры и коэффициенты стружкообразования, влияющие на силовые и трибологические процессы, и изменяющиеся в зависимости от выбранного участка механической обработки сварной разнородной заготовки, состоящей из углеродистой стали 45 и нержавеющей аустенитной стали 12X18Н10Т;

- 3 группа – комбинированные параметры, включающие влияние, как динамических показателей, так и значений процесса стружкообразования.

Разграничения предполагается осуществить посредством изменения обозначения параметров обобщённой двухконтурной математической модели и их индексов в зависимости от их принадлежности к описанным группам. Результаты преобразований представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Преобразованные параметры двухконтурной математической модели по группам

1 Группа - Динамические параметры					
$T_{x2}^2 \rightarrow \begin{cases} X''_{60} \\ X''_{90} \end{cases}$	$T_{x1} \rightarrow \begin{cases} X'_{60} \\ X'_{90} \end{cases}$	$x \rightarrow \begin{cases} x_{60} \\ x_{90} \end{cases}$	$y \rightarrow \begin{cases} y_{60} \\ y_{90} \end{cases}$	$b_x \rightarrow \begin{cases} b_{60}^x \\ b_{90}^x \end{cases}$	$b_y \rightarrow \begin{cases} b_{60}^y \\ b_{90}^y \end{cases}$
$T_{y2}^2 \rightarrow \begin{cases} Y''_{60} \\ Y''_{90} \end{cases}$	$T_{y1} \rightarrow \begin{cases} Y'_{60} \\ Y'_{90} \end{cases}$	$m_x \rightarrow \begin{cases} m_{60}^x \\ m_{90}^x \end{cases}$	$m_y \rightarrow \begin{cases} m_{60}^y \\ m_{90}^y \end{cases}$	$c_x \rightarrow \begin{cases} c_{60}^x \\ c_{90}^x \end{cases}$	$c_y \rightarrow \begin{cases} c_{60}^y \\ c_{90}^y \end{cases}$
$\omega_x \rightarrow \begin{cases} \omega_{60}^x \\ \omega_{90}^x \end{cases}$	$\omega_y \rightarrow \begin{cases} \omega_{60}^y \\ \omega_{90}^y \end{cases}$	$d_x \rightarrow \begin{cases} d_{60}^x \\ d_{90}^x \end{cases}$		$d_y \rightarrow \begin{cases} d_{60}^y \\ d_{90}^y \end{cases}$	

2 Группа - Параметры стружкообразования					
$P_y \rightarrow \begin{cases} P_{45} \\ P_{12} \end{cases}$	$Q_T \rightarrow \begin{cases} Q_{45} \\ Q_{12} \end{cases}$	$T_P \rightarrow \begin{cases} S_{45}^P \\ Au_{12}^P \end{cases}$	$L_P \rightarrow \begin{cases} L_{45}^P \\ L_{12}^P \end{cases}$	$\varepsilon \rightarrow \begin{cases} \varepsilon_{45} \\ \varepsilon_{12} \end{cases}$	
$K_{рез} \rightarrow \begin{cases} K_{45} \\ K_{12} \end{cases}$	$f \rightarrow \begin{cases} f_{45} \\ f_{12} \end{cases}$	$T_Q \rightarrow \begin{cases} S_{45}^Q \\ Au_{12}^Q \end{cases}$	$L_Q \rightarrow \begin{cases} L_{45}^Q \\ L_{12}^Q \end{cases}$		
3 Группа - Комбинированные параметры					
$T_{ky1} \rightarrow \begin{cases} S_{45}^{ky1} \\ Au_{12}^{ky1} \end{cases}$	$T_{kx} \rightarrow \begin{cases} S_{45}^{kx} \\ Au_{12}^{kx} \end{cases}$	$T_{ky2} \rightarrow \begin{cases} S_{45}^{ky2} \\ Au_{12}^{ky2} \end{cases}$	$k_x \rightarrow \begin{cases} k_{45} \\ k_{12} \end{cases}$	$\gamma \rightarrow \begin{cases} \gamma_{45}^{60} & \gamma_{45}^{90} \\ \gamma_{12}^{60} & \gamma_{12}^{90} \end{cases}$	$A_x \rightarrow \begin{cases} A_{45}^{60} & A_{45}^{90} \\ A_{12}^{60} & A_{12}^{90} \end{cases}$

Так к первой группе параметров относятся такие показатели как: постоянные времени; постоянных времени демпфирования; инерционные, диссипативные и упругие характеристики; угловая частота в контурах. Их разграничение осуществляется по степени затяжки разжимного конуса.

Ко второй группе параметров относятся: силы резания при механической обработке; трибологические процессы; постоянные составляющие сил трения и силы резания; длины запаздывания силовых процессов; коэффициент резания; коэффициент трения; коэффициент усадки стружки. Разграничение данной группы производится по физико-механическим параметрам обрабатываемых сталей на различных участках сварной заготовки.

Параметры третьей группы включают в себя комбинации, состоящие из уже описанных ранее динамических показателей и значений процесса стружкообразования. Разграничения в верхних и нижних индексах учитывают особенности степени затяжки разжимного конуса и физико-механическим параметрам обрабатываемых сталей.

Таким образом, напряжённо-деформированное состояние антивибрационной расточной оправки можно учесть через динамические параметры, входящие в явном виде в формулы по расчёту постоянных времени и постоянных времени демпфирования. В свою очередь физико-механические

свойства обрабатываемых участков учитываются через постоянные составляющие сил трения и силы резания, коэффициент передачи, а также постоянные времени демпфирования от изменения скорости резания.

Перемену механических свойств участков растачиваемой сварной детали можно представить как последовательную смену параметров со значений $S\{P_{45}, Q_{45}, L_{45}^P, L_{45}^Q, S_{45}^P, S_{45}^Q, S_{45}^{ky1}, S_{45}^{ky2}, S_{45}^{kyx}, k_{45}, \gamma_{45}^{90}, A_{45}^{90}, f_{45}, \varepsilon_{45}\}$ на первом участке, $N\{P_x \rightarrow 0, Q_y \rightarrow 0, \}$ – на границе раздела двух сталей, до $S_3\{P_{12}, Q_{12}, L_{12}^P, L_{12}^Q, S_{12}^P, S_{12}^Q, S_{12}^{ky1}, S_{12}^{ky2}, S_{12}^{kyx}, k_{12}, \gamma_{12}^{90}, A_{12}^{90}, f_{12}, \varepsilon_{12}\}$ на втором участке.

Ввод-вывод данных технологического процесса в разрабатываемой математической модели осуществляется тумблером (3.36):

$$C = \begin{cases} \text{– Если } T_I: t_0 \leq t_1: \\ S \left\{ P_{45}, Q_{45}, L_{45}^P, L_{45}^Q, S_{45}^P, S_{45}^Q, S_{45}^{ky1}, \right. \\ \left. S_{45}^{ky2}, S_{45}^{kyx}, k_{45}, \gamma_{45}^{90}, A_{45}^{90}, f_{45}, \varepsilon_{45} \right\}; \\ \text{– Если } T_{II}: t_1 < t_2: \\ N\{P_x \rightarrow 0, Q_y \rightarrow 0, \}; \\ \text{– Если } T_{III}: t_2 < t_3: \\ Au \left\{ P_{12}, Q_{12}, L_{12}^P, L_{12}^Q, S_{12}^P, S_{12}^Q, S_{12}^{ky1}, \right. \\ \left. S_{12}^{ky2}, S_{12}^{kyx}, k_{12}, \gamma_{12}^{90}, A_{12}^{90}, f_{12}, \varepsilon_{12} \right\}; \end{cases}, \quad (3.36)$$

где S – комплекс параметров, отражающий механические и динамические свойства участка из Стали 45; Au – комплекс параметров, отражающий механические и динамические свойства участка из аустенитной стали 12X18Н10Т; N – параметр, отражающий переходной процесс при растачивании разнородных участков; от t_0 до t_3 – время обработки, затрачиваемое на прохождение всех участков сварной детали.

С учётом вышесказанного, на примере обработки сварной детали, состоящей из Стали 45 (ГОСТ 1050-2013) и нержавеющей стали 12X18Н10Т ГОСТ 5949-2018, была составлена математическая модель процесса растачивания отверстий (Рисунок 3.7), учитывающая разнородность его элементов за счёт работы тумблера.

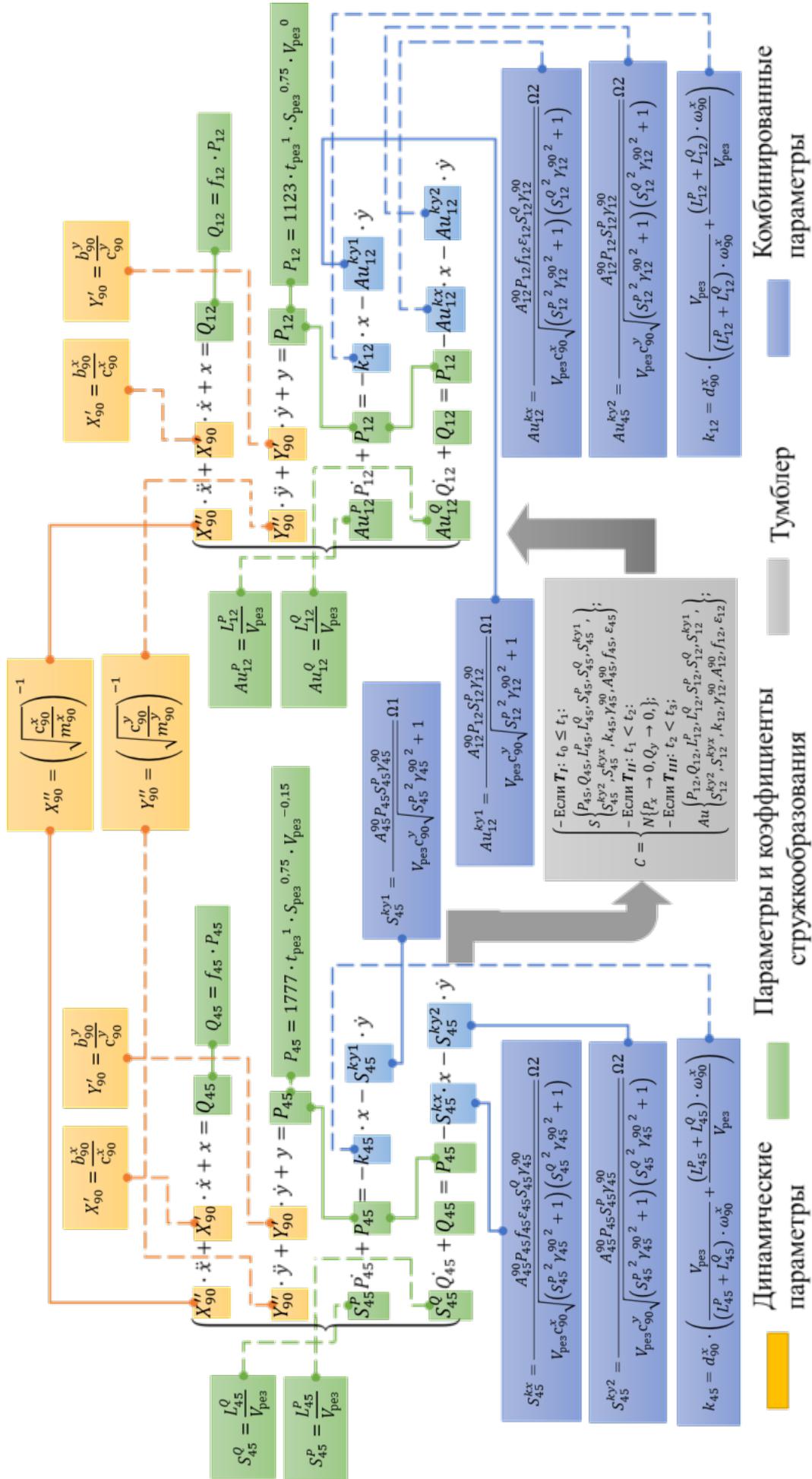


Рисунок 3.7 – Математическая модель процесса растягивания отверстий в сварных деталях, учитывающая

разнородность элементов растачиваемой конструкции

3.4 Составление передаточных функции линейных дифференциальных уравнений

Решение системы линейных дифференциальных уравнений 3.28 – 3.31 с учётом параметров антивибрационной расточной оправки в напряжённо-деформированном состоянии, осуществлялась с использованием операционного исчисления, в основе которого лежат преобразования Лапласа.

Преобразование линейных дифференциальных уравнений по методу Лапласа даёт возможность ввести удобное понятие передаточной функции, характеризующей динамические свойства рассматриваемой замкнутой системы. Передаточной функцией называется отношение изображения выходного воздействия $Y(p)$ к изображению входного $X(p)$ при нулевых начальных условиях:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)}. \quad (3.37)$$

Передаточная функция представляет собой дробно-рациональную функцию комплексной переменной:

$$W(p) = \frac{B(p)}{A(p)} = \frac{b_0 + b_1p + b_2p^2 + \dots + b_m p^m}{a_0 + a_1p + a_2p^2 + \dots + a_n p^n}, \quad (3.38)$$

где $B(p)$ и $A(p)$ – полином числителя и знаменателя.

Следовательно, уравнение системы 3.28 – 3.31 можно представить в операторной форме:

Колебательное звено второго порядка по координате x

$$W_x = \frac{1}{T_{x2}^2 p^2 + T_{x1} p + 1}. \quad (3.39)$$

Колебательное звено второго порядка по координате y

$$W_y = \frac{1}{T_{y2}^2 p^2 + T_{y1} p + 1}. \quad (3.40)$$

Апериодическое звено 1-го порядка по запаздыванию силы трения

$$W_{Q_T} = \frac{1}{T_Q p + 1}. \quad (3.41)$$

Апериодическое звено 1-го порядка по запаздыванию силы резания

$$W_{Py} = \frac{1}{T_p p + 1}. \quad (3.42)$$

Идеально дифференцируемые звенья по координате y

$$W_{ky1} = T_{ky1} p, \quad (3.43)$$

$$W_{ky2} = T_{ky2} p. \quad (3.44)$$

Идеально дифференцируемое звено по координате x

$$W_{kx} = T_{kx} p. \quad (3.45)$$

Идеально дифференцируемое звено

$$W_{k_x} = k_x. \quad (3.46)$$

Структурная схема двухконтурной динамической системы по растачиванию изделий из разнородных металлов 3.28 – 3.31 представлена на Рисунке 3.8. В звенья выписаны соответствующие им передаточные функции 3.39 – 3.46.

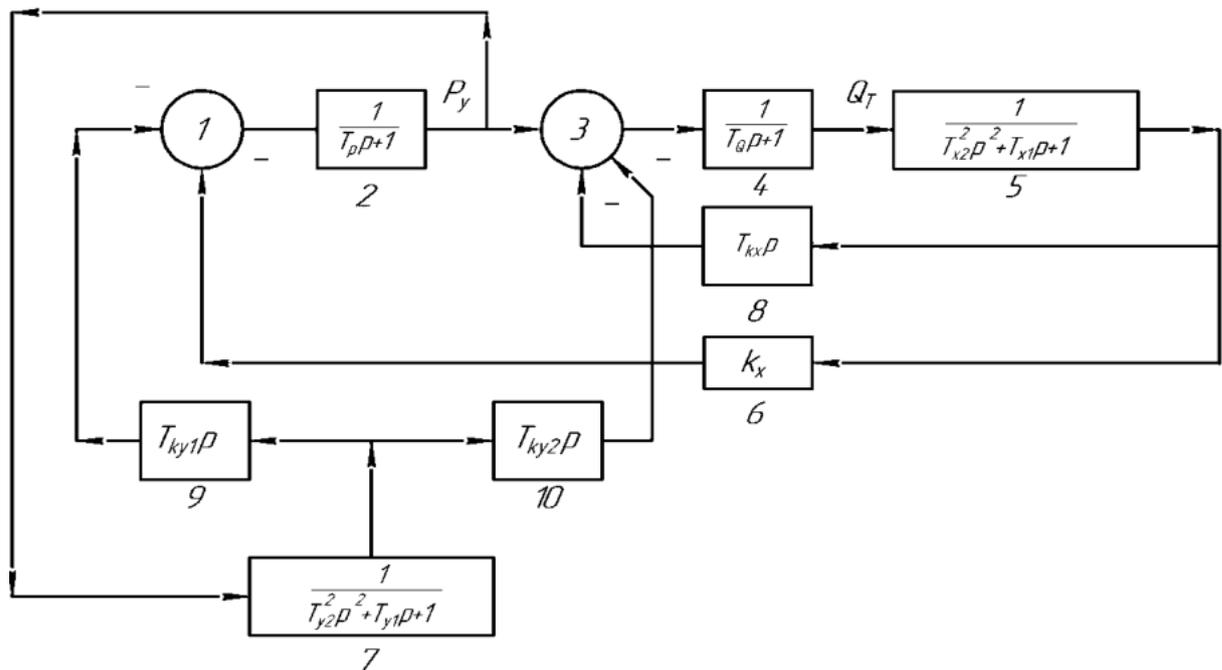


Рисунок 3.8 – Структурная схема двухконтурной динамической системы по растачиванию изделий из разнородных металлов

Центральным ядром рассматриваемой системы является замкнутый контур x , в направлении которого действует сила трения стружки по резцу Q_T . В контур x входит одно колебательное звено второго порядка 5, два

апериодических звеньев 1-го порядка 2 и 4, два идеально дифференцируемых звена 8 и 6. Звенья 2 и 4 отвечают за запаздывания силы P_y и Q_T . В контур уvhодит одно колебательное звено второго порядка 7, два апериодических звеньев 1-го порядка 9 и 10. Выходной сигнал от возмущения поступает в звено 1 и далее через звенья 2 и 3 поступает на вход звена 4. Из звена 4 в виде возмущённой силы Q_T поступает на вход колебательное звено второго порядка 5. Сигнал из звена 5 в виде обратной отрицательной связи совместно с коэффициентом передач 6 попадает в звено суммирования. Идеально дифференцируемые звенья 8, 9, 10 и одно колебательное звено второго порядка 7 характеризуют демпфирующую способность замкнутой системы по координатам x и y [113, 116].

Как можно заметить из структурной схемы, поведение замкнутой динамической системы по растачиванию деталей из разнородных металлов определяется в основном контуром x . В свою очередь внутренние обратные связи позволяют существенно увеличить демпфирующую способность разработанной системы, снижая амплитуду колебательного процесса и обеспечивая заданные технологическим процессом качественные показатели изделия.

3.5 Установление влияния технологических параметров обработки антивибрационным инструментом на устойчивость процесса растачивания

Условием допустимого придельного цикла для расточных операций будут амплитуды колебаний, при которых достигается, установленная технологическим процессом, шероховатость поверхности. На получистовой и чистовой растачивающей операции важным критерием является соблюдение $A_x \approx 0$, что соответствует квазиравновесному состоянию системы, при котором обеспечивается необходимая шероховатость равная $R_a = 1$ мкм.

На получистовом и чистовом переходах операции растачивания, как правило, используются подрезные резцы с главным углом в плане равным $\varphi_{рез} = 35^\circ$ (Рисунок 3.9).

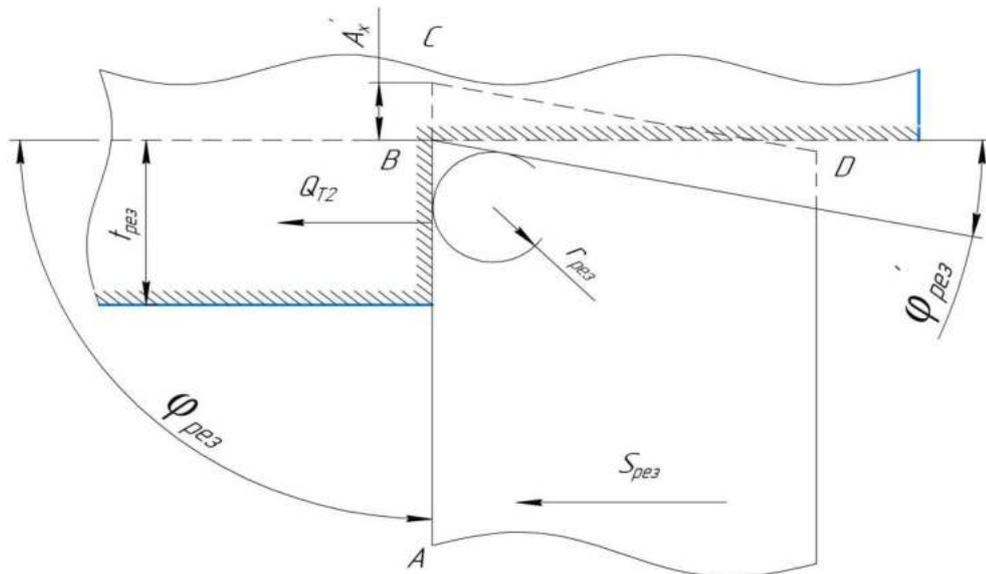


Рисунок 3.9 – Схема по расчёту допустимой глубины резания при получистовом и чистовом переходе операции растачивания, где: $r_{рез}$ – радиус закругления кромки

Режущая часть инструмента AB не влияет на устойчивость в поперечном направлении при получистовой и чистовой расточной операции. Главным недостатком таких инструментов является малый угол, в результате которого снижается тепловая стойкость. Избежать такого недостатка можно за счёт уменьшения вспомогательного угла в плане $\varphi'_{рез}$ (до 15°), что приводит к возможной неустойчивости от возмущения. В процессе растачивания, при поперечном возмущении, режущая кромка периодически погружается в обрабатываемую заготовку с амплитудой A'_x . При врезании в заготовку ширина CD за полупериод изменяется от нуля до $A'_x/tg\varphi'_{рез}$, во второй фазе инструмент освобождается от нагрузок и происходит рассеивание энергии колебаний.

Как уже описывалось ранее, технологический процесс изготовления детали типа «втулка», состоит из последовательных переходов операции растачивания: получистовая и чистовая механическая обработка.

Последующее моделирование требует оценки устойчивости действующих режимов расточной операции при использовании стандартной борштанги и разработанного антивибрационного инструмента.

На основании составленных передаточных функций (3.39-3.46) системы линейных дифференциальных уравнений (3.28-3.31), в среде графического программирования LabVIEW 2019 через модули «Control Design and Simulation Module» и «MathScript RT Module» осуществлялось последовательное соединение функциональных блоков, согласно представленной на Рисунке 3.8 структурной схеме замкнутой двухконтурной динамической системы [62].

Графический интерфейс, разработанной блок схемы, представляется в виде лицевой панели, состоящей из входных и выходных параметров (Рисунок 3.10). Вводя необходимые входные параметры динамической системы растачивания разнородных материалов в виртуальный прибор, осуществляется расчёт двухконтурной модели и через графические элементы Waveform Graph отображаются накопленные массивы данных.

Основной задачей данного компьютерного моделирования является определение режимов расточных операций, при которых процесс механической обработки будет обладать динамической устойчивостью и обеспечивать, заданные технологическим процессом, шероховатость поверхности на участках с конструкционной и нержавеющей сталью и на границе перехода, согласно предельной амплитуде колебательного процесса.

Необходимые параметры для функционирования эквивалентной математической модели (Рисунок 3.10) выбирались согласно рассчитанным значениям из Таблицы 3.1 и графикам на Рисунке 3.4.

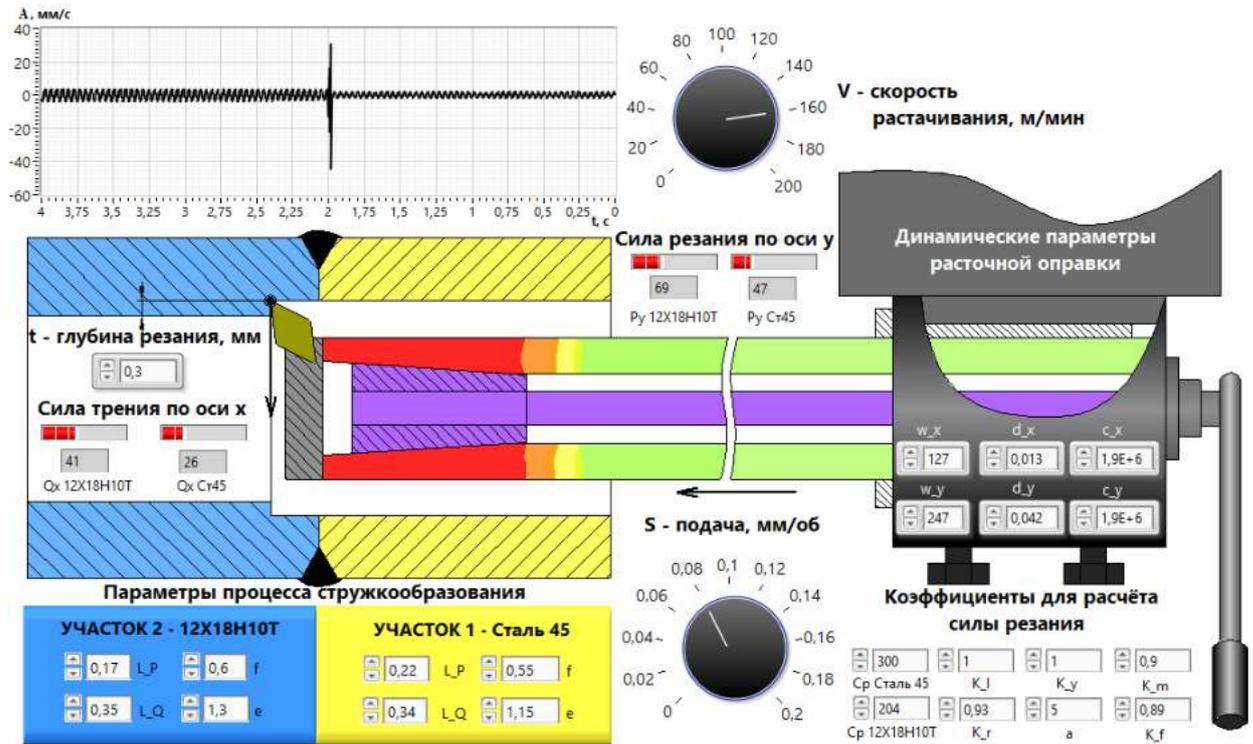


Рисунок 3.10 – Виртуальный осциллограф по расчёту автоколебательного процесса при растачивании разнородных материалов

Результаты моделирования замкнутой динамической системы растачивания глубоких отверстий позволили установить следующие закономерности протекания процесса механической обработки при изготовлении изделий из разнородных материалов.

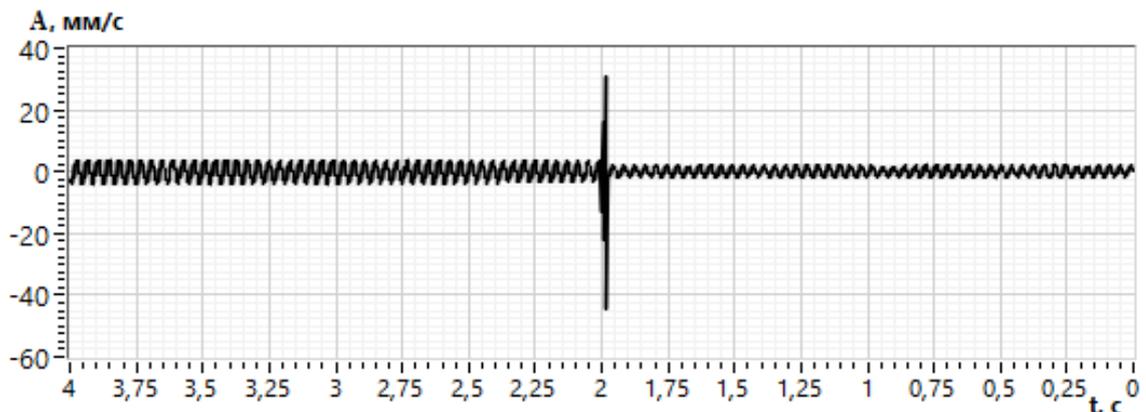


Рисунок 3.11 – Колебательный процесс при растачивании стандартной оправкой на чистовом переходе: $c_y = c_x = 1,9 \cdot 10^6$ Н/м, $d_y = 0,013$, $d_x = 0,042$, $w_y = 247$ с⁻¹, $w_x = 127$ с⁻¹

Тенденция неустойчивого процесса механической обработки внутренних отверстий на границе раздела двух материалов, как подтвердило

моделирование, присуще чистовым переходам процесса растачивания при использовании стандартного инструмента. Это обусловлено низкими показателями динамических параметров в используемой оправке, поэтому момент перехода из участка с конструкционной сталью в участок с нержавеющей сталью (Рисунок 3.11) сопровождается значительным скачком вибрации.

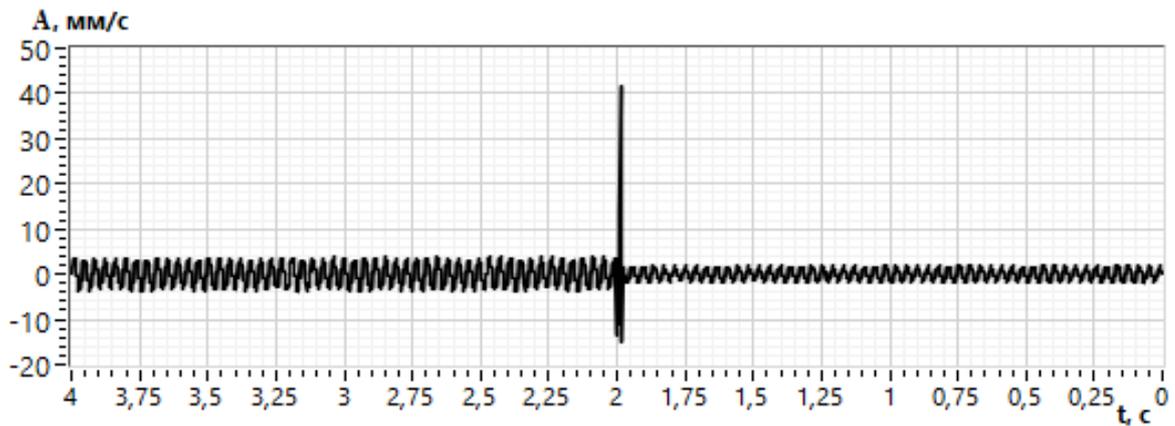


Рисунок 3.12 – Колебательный процесс при растачивании разработанной оправкой с силой затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 60 \text{ Н} \cdot \text{м}$ на чистовом переходе:
 $c_y = c_x = 2 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, $d_y = 0,017$, $d_x = 0,036$, $w_y = 213 \text{ с}^{-1}$, $w_x = 127 \text{ с}^{-1}$

Положительно сказывается применение антивибрационной расточной оправки в напряжённо-деформированном состоянии с моментом затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 60 \text{ Н} \cdot \text{м}$ на процесс чистового растачивания отверстий в деталях из конструкционных и нержавеющей сталей (Рисунок 3.12). Видно, что протекает устойчивый колебательный процесс, однако на границе раздела двух материалов амплитудные значения снизились только на отрицательных значениях амплитуд виброскорости (примерно на 66 %), тогда как выше оси виброскорости, обнаружен резкий скачок амплитуд виброскорости на 40 % по сравнению с вибрациями, возникающими при растачивании стандартной расточной оправкой.

Однако наибольший эффект от степени напряжённо-деформированного состояния разработанной оправки обнаружен при моменте затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Так судя по амплитудам колебаний на каждом из участков, растачивание сопровождается устойчивым

механическим процессом. Видно, что на границе раздела двух материалов (Рисунок 3.13) амплитуда возмущений снизилась примерно на 69 % по сравнению с амплитудами колебаний, возникающих при работе стандартной оправки.

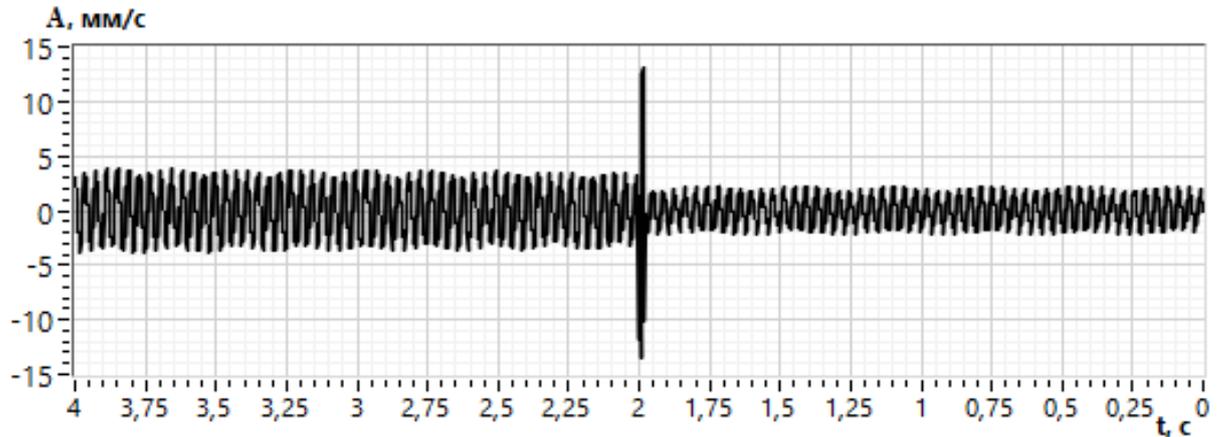


Рисунок 3.13 – Колебательный процесс при растачивании разработанной оправкой с силой затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$ на чистовом переходе :
 $c_y = c_x = 2,4 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$, $d_y = 0,016$, $d_x = 0,063$, $w_y = 258 \text{ с}^{-1}$, $w_x = 128 \text{ с}^{-1}$

Оценивая имеющиеся выше данные, можно утверждать, что технология растачивания на основе использования антивибрационной расточной оправки с регулируемым напряжённо-деформированным состоянием, позволит непрерывно растачивать все участки отверстия сварной конструкции, устойчиво проходить границу раздела двух материалов с незначительным увеличением амплитуды колебаний, что позволит ускорить технологический процесс растачивания по сравнению с применяемой ранее технологией.

3.6 Выводы по третьей главе

1. Проведён аналитический обзор существующих источников литературы, позволивший установить, что наиболее неустойчивым звеном в глобальной системе станка с ЧПУ является подсистема «инструмент», на основании которой составлена схема динамической системы механической обработки при растачивании отверстий из разнородных материалов.

2. Построена двухконтурная математическая модель на основе дифференциальных уравнений Лагранжа 2-го рода, которая описывает процесс движения в нормальном и касательном контуре расточной оправки с учётом параметров приведённой массы m , диссипативных сил b и жёсткости c .

3. Учтена взаимосвязь между движущимися подсистемами «инструмент» и «заготовка» через процесс стружкообразования, что позволяет отразить особые свойства автономной замкнутой системы, для которой характерен автоколебательный режим работы и переход в неустойчивое состояние, ухудшающий качественные показатели обработанной поверхности.

4. Предложен механизм учёта напряжённо-деформированного состояния антивибрационной расточной оправки в системе линейных дифференциальных уравнений, который осуществляется за счёт изменения динамических параметров: демпфирования; жёсткости; приведённой массы.

5. В математическую модель процесса растачивания введён тумблер (переключатель), учитывающий особенности механических свойств сварной детали как последовательную смену параметров со значениями $S\{P_{45}, Q_{45}, L_{45}^P, L_{45}^Q, S_{45}^P, S_{45}^Q, S_{45}^{ky1}, S_{45}^{ky2}, S_{45}^{kyx}, k_{45}, \gamma_{45}^{90}, A_{45}^{90}, f_{45}, \varepsilon_{45}\}$ на первом участке, $N\{P_x \rightarrow 0, Q_y \rightarrow 0, \}$ на границе раздела двух сталей, до $S_3\{P_{12}, Q_{12}, L_{12}^P, L_{12}^Q, S_{12}^P, S_{12}^Q, S_{12}^{ky1}, S_{12}^{ky2}, S_{12}^{kyx}, k_{12}, \gamma_{12}^{90}, A_{12}^{90}, f_{12}, \varepsilon_{12}\}$ на втором участке.

6. Установлен положительный эффект от использования антивибрационной расточной оправки (при $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$) на устойчивость процесса растачивания при имитационном моделировании в программной среде NI LabVIEW 2019, что позволяет на чистовом переходе достичь снижения амплитуды колебаний на границе раздела двух материалов примерно на 69 % по сравнению с соответствующими вибрациями при реализации базового технологического процесса растачивания.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОПРАВКИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ И ТОЧНОСТИ ФОРМЫ ДЕТАЛИ ТИПА «ВТУЛКА» В ПРОЦЕССЕ РАСТАЧИВАНИЯ

4.1 Исследования влияния степени напряжённо-деформированного состояния оправки на процесс динамической устойчивости растачивания отверстия

Целью представленных в работе экспериментальных исследований является анализ влияния степени напряжённо-деформированного состояния оправки на технологию растачивания отверстия в детали типа «втулка». Данное исследование даёт возможность определить граничные условия устойчивости процесса растачивания отверстий и назначать оптимальные режимы для разработанного метода при различных параметрах механической обработки.

Во время экспериментальных исследований на станке Hyundai WIA L300C с применением антивибрационной расточной оправки с регулируемым напряжено-деформированным состоянием и расточной оправки Silent Tools шведской компании Sandvik Cormorant, далее именуемой как стандартная, отработывалась технология растачивания внутренних прецизионных поверхностей деталей с применением вибродиагностической аппаратуры «Prüftechnik VIBXPERTEX» (Рисунок 4.1) (Приложение А). Обработываемая деталь состоит из конструкционной и нержавеющей части, соединённых путём сварочной операции.

В ходе проведённых исследований, на первом этапе, были определены области устойчивости по двум параметрам $b_{рез}$ и $V_{рез}$ при растачивании образцов, изготовленных из стали (Сталь 45 ГОСТ 1050-2013) (Рисунок 4.2) и нержавеющей стали (12X18H10T ГОСТ 5949-2018) (Рисунок 4.3). На

представленных ниже диаграммах (Рисунок 4.2; Рисунок 4.3) показаны граничные кривые, которые описывают зоны устойчивости для антивибрационного расточного инструмента в напряжённо-деформированном состоянии и расточной оправки Silent Tools шведской компании Sandvik Coromant, которая демпфирует вибрации при помощи инертных масс [120]. Справа от границ находится область режимов резания, при которых процесс растачивания соответствующей обрабатываемой стали является неустойчивым и ведёт к возникновению вибраций инструмента, в левой части диаграммы находится зона устойчивого процесса растачивания.



Рисунок 4.1 – Производственные испытания на станке Hyundai WIA L300C:

- 1 – опытный образец; 2 – предлагаемая оправка; 3 – оправка Silent Tools;
4 – виброанализатор «Prüftechnik VIBXPERTEX»

Точки А, Б, В, Г, Д и Е на границах областей устойчивости для конструкционной и нержавеющей стали (Рисунок 4.2 и Рисунок 4.3) являются произвольными точками с соответствующими режимными параметрами механической обработки, где точки А (Рисунок 4.4, а) и Г (Рисунок 4.5, а) – точки устойчивого процесса растачивания при использовании стандартной расточной оправки; Б (Рисунок 4.4, б) и Д (Рисунок 4.5, б) – точки устойчивого

процесса растачивания для расточной оправки, находящейся в напряжённо-деформированном состоянии; В (Рисунок 4.4, в) и Е (Рисунок 4.5, в) – точки, в которых технологическая система определяется как неустойчивая.

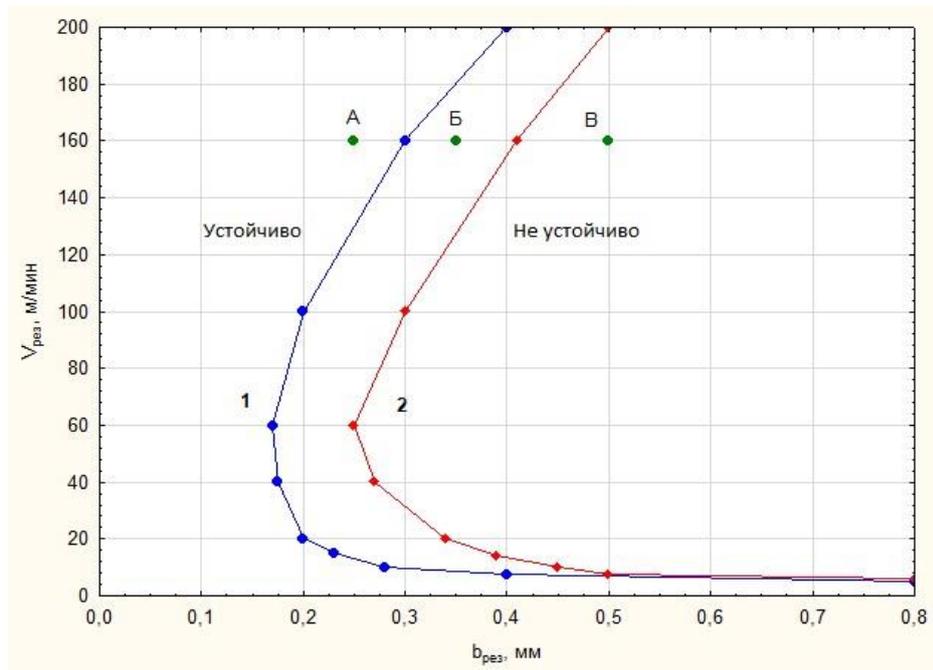


Рисунок 4.2 – Граница области устойчивости при растачивании отверстий в образцах из Стали 45 ГОСТ 1050-2013, где: 1 – расточная оправка Silent Tool компании Sandvik; 2 – расточная оправка с напряжённо-деформированным состоянием

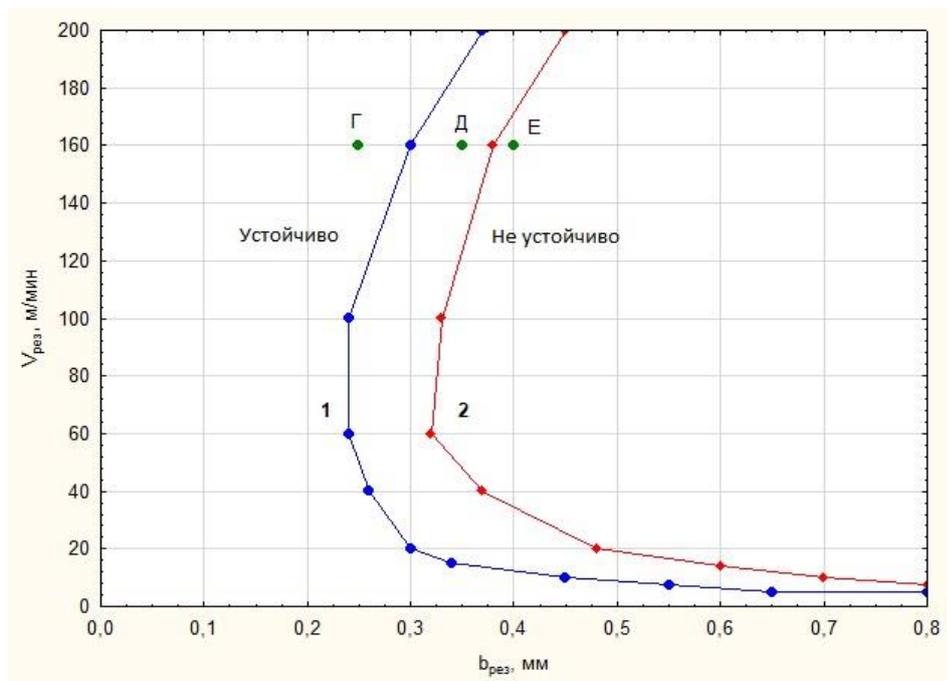
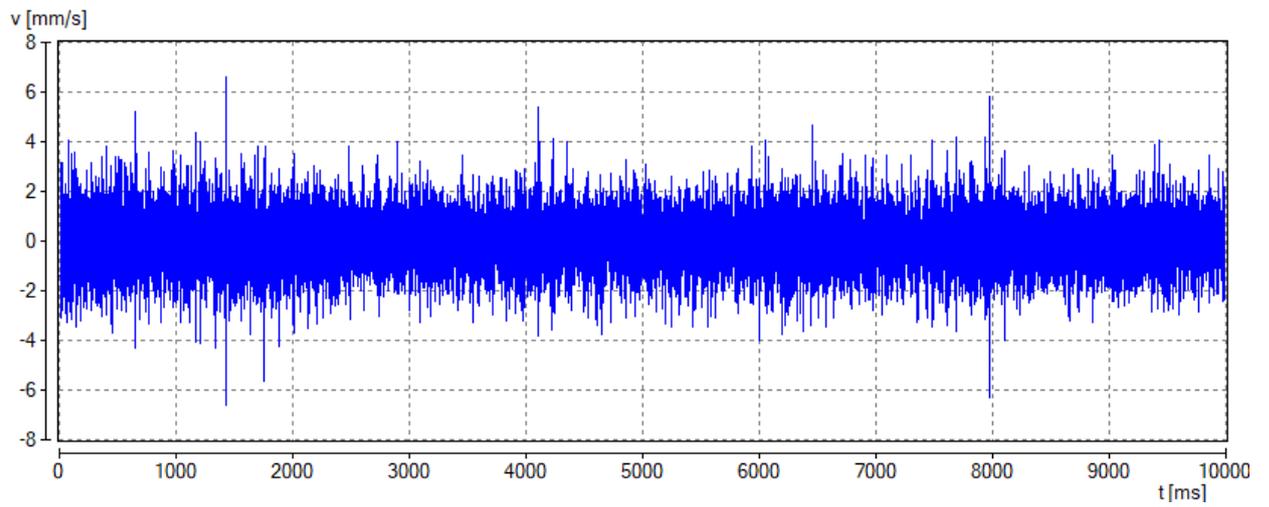
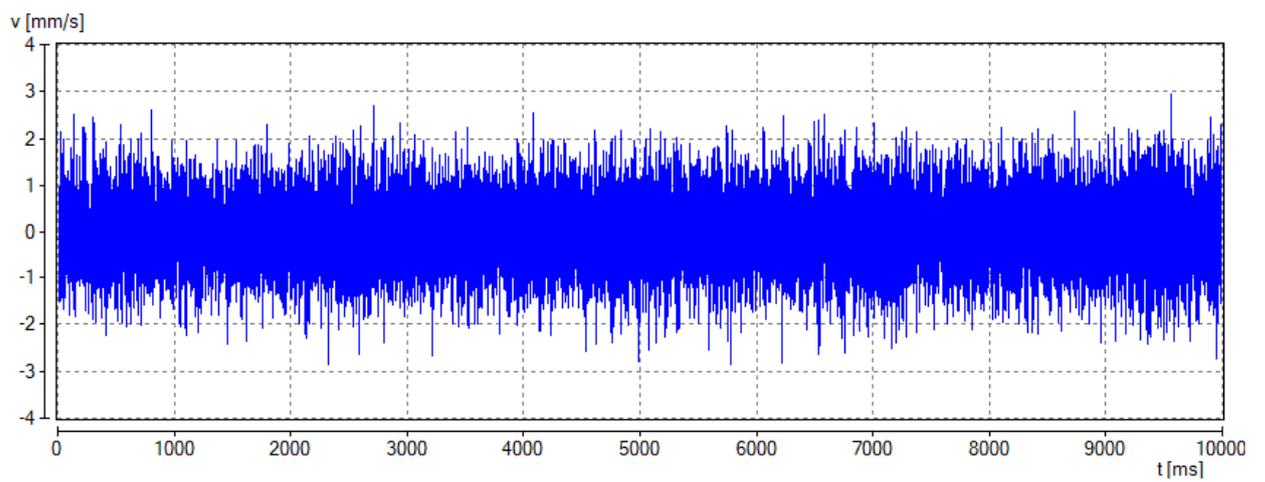


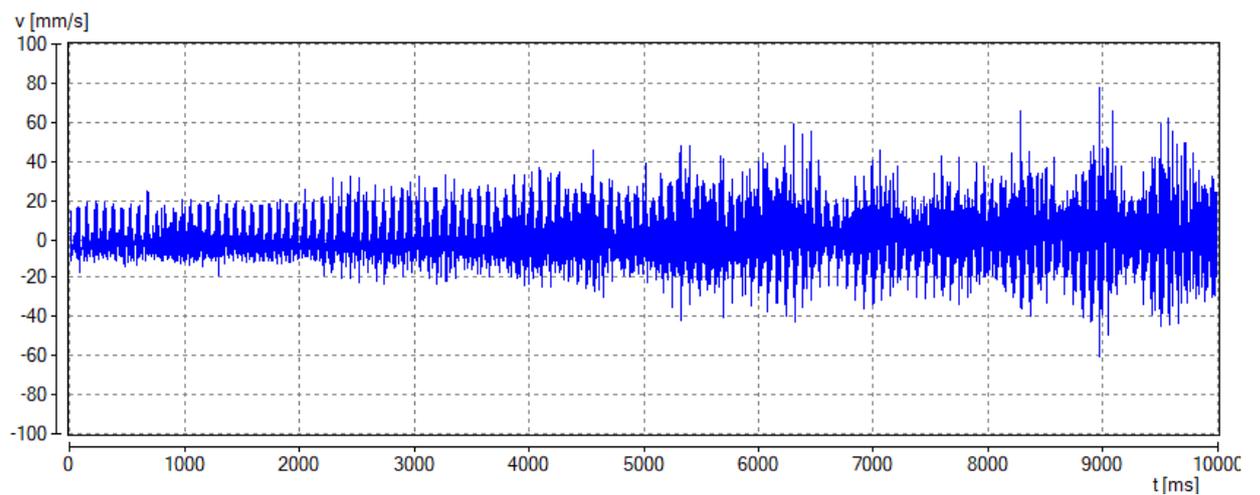
Рисунок 4.3 – Граница области устойчивости при растачивании отверстий в образцах из нерж. стали 12X18H10T ГОСТ 5949-2018, где: 1 – расточная оправка Silent Tool компании Sandvik; 2 – расточная оправка с напряжённо-деформированным состоянием



а) Виброграмма в точке А графика устойчивости (Рисунок 4.2)

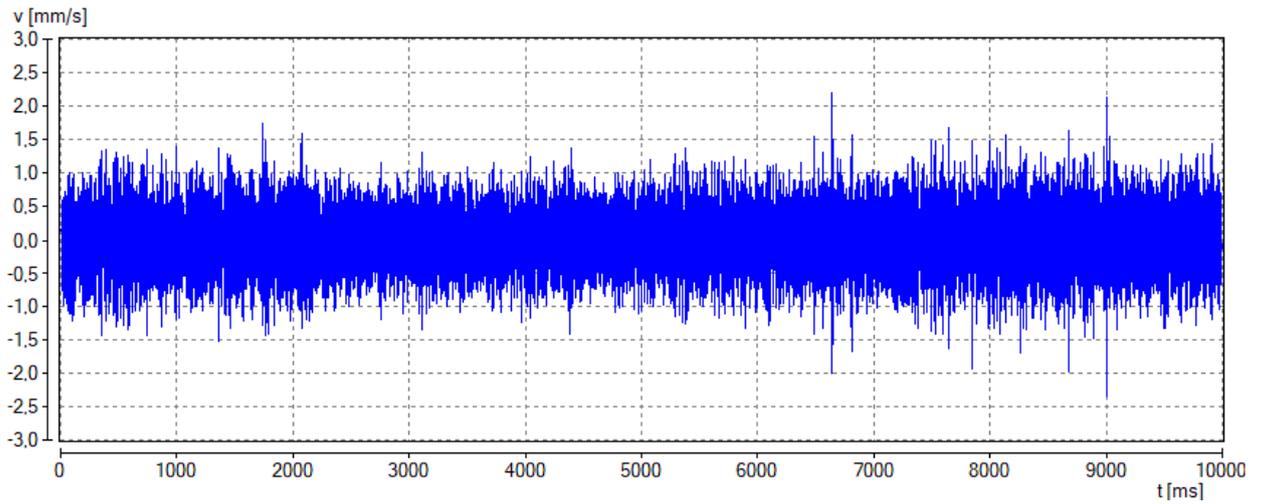


б) Виброграмма в точке Б графика устойчивости (Рисунок 4.2)

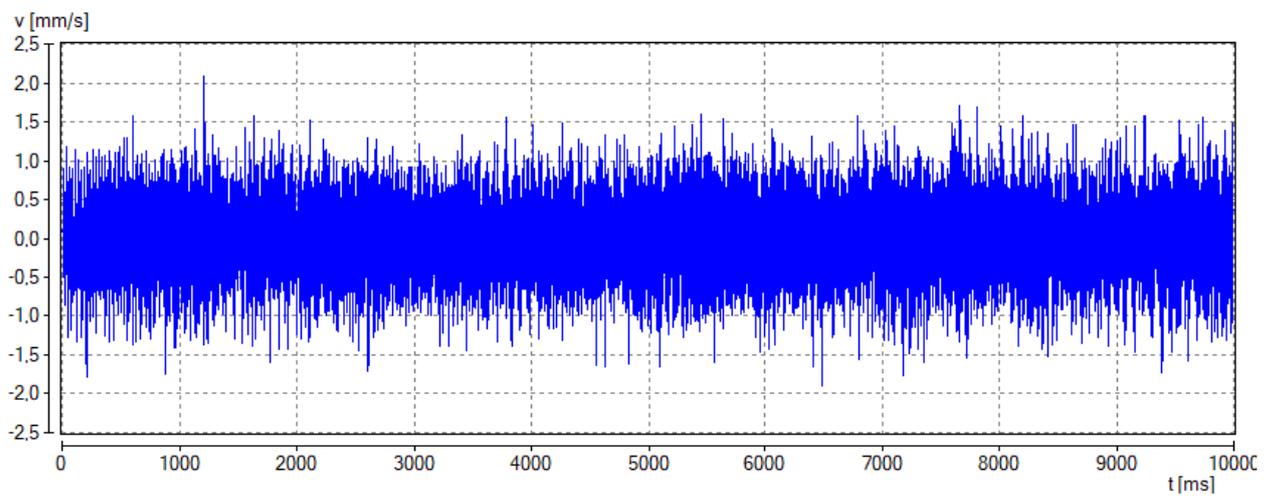


в) Виброграмма в точке В графика устойчивости (Рисунок 4.2)

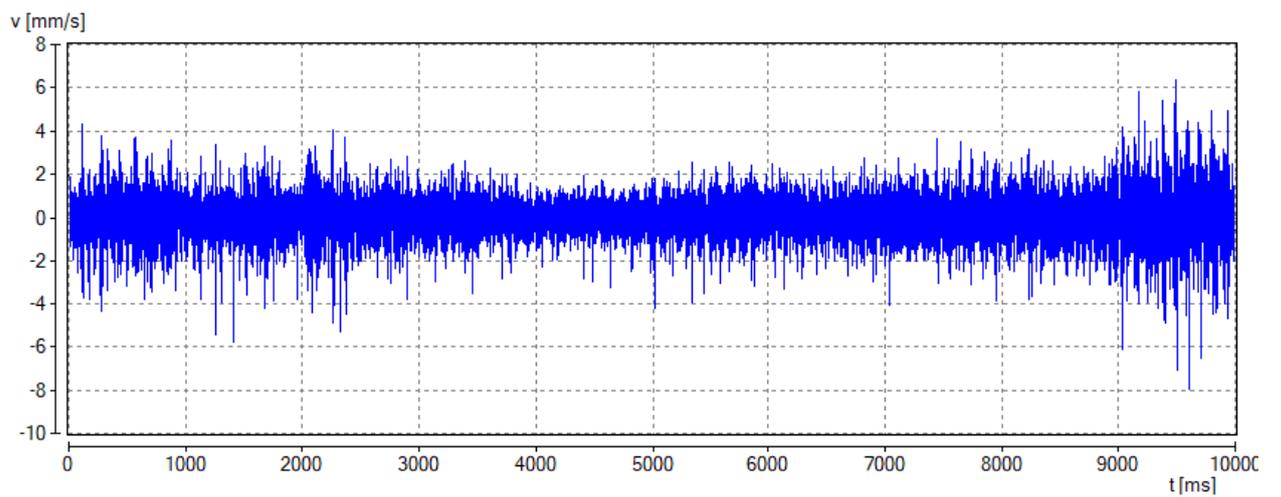
Рисунок 4.4 – Виброграммы в произвольных точках графика устойчивости (Рисунок 4.2)



а) Виброграмма в точке Г графика устойчивости (Рисунок 4.3)



б) Виброграмма в точке Д графика устойчивости (Рисунок 4.3)



в) Виброграмма в точке Е графика устойчивости (Рисунок 4.3)

Рисунок 4.5 – Виброграммы в произвольных точках графика устойчивости (Рисунок 4.3)

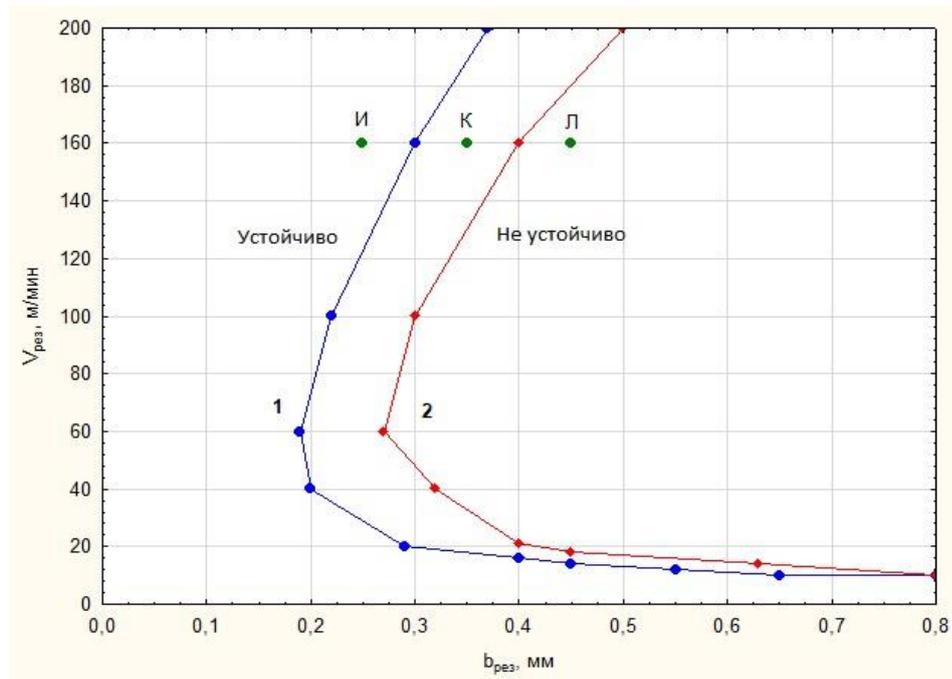
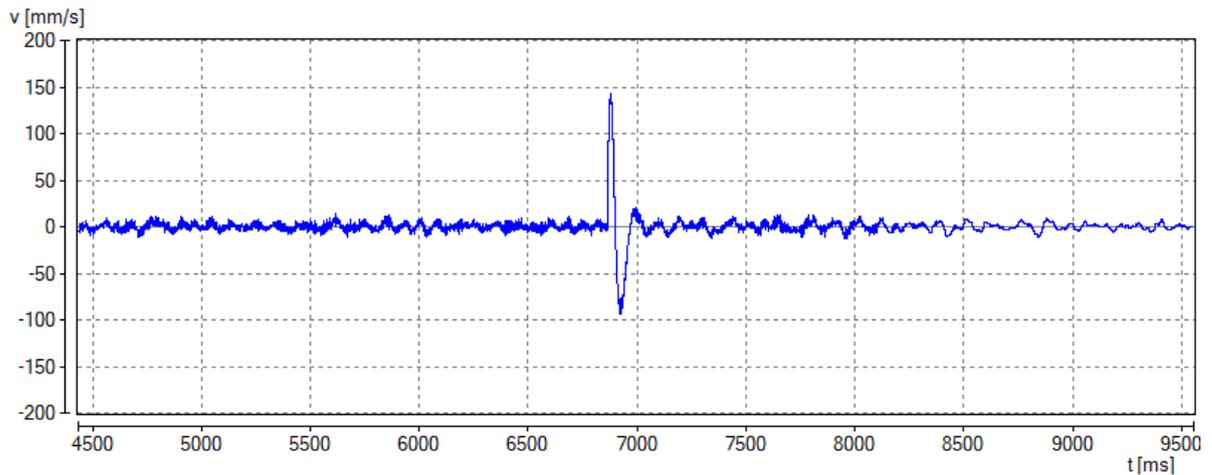


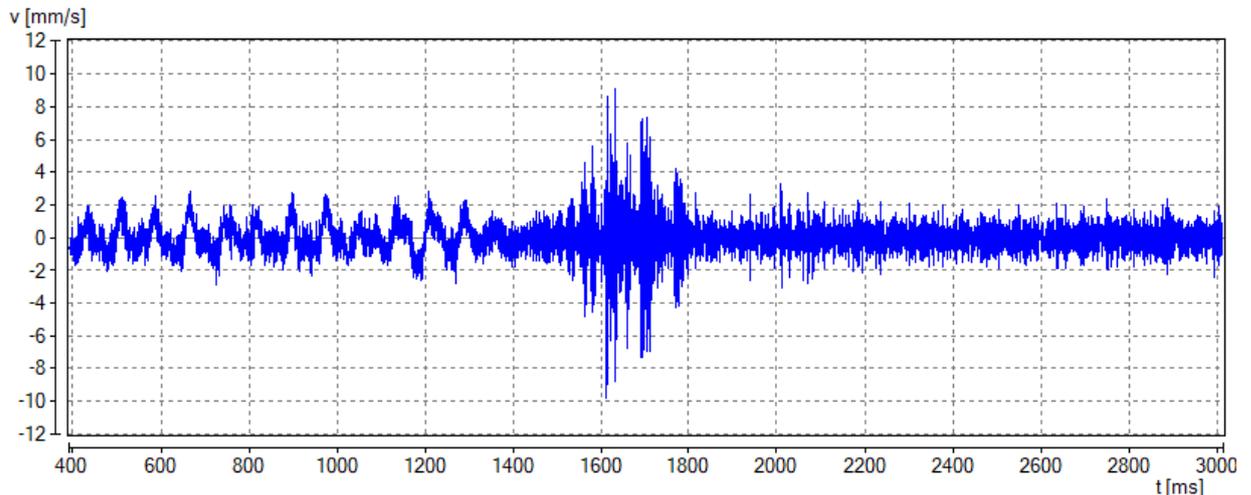
Рисунок 4.6 – Граница области устойчивости при растачивании отверстий в образцах, сваренных из Стали 45 ГОСТ 1050- и нержавеющей стали 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-2018 с виброграммами в выбранных точках: 1 – стандартная расточная оправка; 2 – расточная оправка с напряжённо-деформированным состоянием

На основе вышеприведённых данных были определены оптимальные режимные параметры резания необходимые для проведения второго этапа исследований. Второй этап исследований заключался в определении области устойчивости при растачивании образцов, сваренных из стали (Сталь 45 ГОСТ 1050-2013) и нержавеющей стали (12Х18Н10Т ГОСТ 5949-2018) (Рисунок 4.6). В ходе исследований были выявлены причины возникновения высоких амплитуд вибраций на границе перехода расточного инструмента из одного материала в другой. В связи с тем, что в основе механизма демпфирования расточной оправки Silent Tools лежит инерционное тело, которое, при нестабильном резании, не успевает войти в противофазу с колебаниями конца оправки, не происходит подавление колебаний, а зачастую являются следствием значительного увеличения его интенсивности (Рисунок 4.7, а). Как результат, на границе раздела двух разнородных материалов, существует участок с задирами, что не допустимо исходя из технологических требований, предъявляемых к изделию. Точки И, К и Л являются

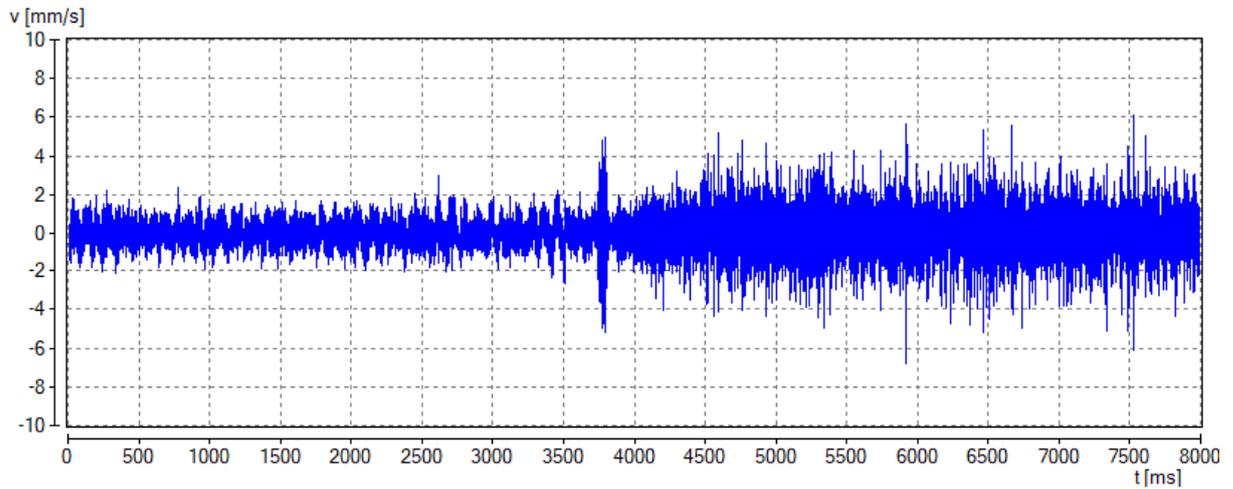
произвольными точками на границе области устойчивости (Рисунок 4.6) с соответствующими режимными параметрами механической обработки, где точка И (Рисунок 4.7, а) – точка устойчивого процесса растачивания при использовании стандартной расточной оправки; К (Рисунок 4.7, б) – точка устойчивого процесса растачивания для напряжённо-деформированной оправки; Л (Рисунок 4.7, в) - точки, в которых технологическая система определяется как неустойчивая.



а) Виброграмма в точке И графика устойчивости (Рисунок 4.6)



б) Виброграмма в точке К графика устойчивости (Рисунок 4.6)



в) Виброграмма в точке Л графика устойчивости (Рисунок 4.6)

Рисунок 4.7 – Виброграммы в произвольных точках графика устойчивости (Рисунок 4.6)

В ходе испытаний была сформирована технология и выявлены следующие рекомендации: при относительно небольшом затягивании, в среднем от 60 до 90 Н·м, образовывается достаточно чистая поверхность на протяжении всего участка (до $Ra=1$ мкм) при различных вылетах инструмента. Отталкиваясь от полученных выше данных, можно рекомендовать режимные параметры течения и момент затяжки инструмента для пар разнородных деталей, сваренных между собой для достижения рекомендуемых показателей точности и шероховатости поверхности.

4.2 Исследования влияния степени напряжённо-деформированного состояния оправки на параметры шероховатости внутренней прецизионной поверхности

Шероховатость поверхности, как один из важнейших геометрических характеристик качества рабочих поверхности деталей, оказывает существенное влияние на их эксплуатационные показатели. Существует прямая связь между прочностью деталей и шероховатостью её поверхностей. Во время переменных нагрузок, разрушение детали объясняется концентрацией напряжений, вследствие наличия неровностей на рабочих

поверхностях детали. Так уменьшением параметров шероховатости уменьшается вероятность возникновения поверхностных трещин при усталости металла. Следует также понимать, что уменьшение параметров шероховатости поверхности достаточно сильно улучшает антикоррозионные свойства деталей. Вышеперечисленное имеет существенное значение только тогда, когда для рабочих поверхностей не применяются защитные покрытия.

Множество факторов, связанных с условиями изготовления заготовки, оказывает влияние на формирование шероховатости поверхности. Например, высота и форма неровностей обусловлены режимами механической обработки и вида обработки; геометрии и стойкости инструмента; типа и состояния применяемого оборудования; способа охлаждения и смазывания расточного инструмента; используемой оснастки и дополнительных приспособлений; микроструктуры и химического состава обрабатываемого материала.

Представленные выше факторы, от которых зависит шероховатость обработанной поверхности, можно распределить в три обобщённые группы:

- 1) факторы, связанные с геометрией процесса резания;
- 2) факторы, связанные с пластической и упругой деформациями обрабатываемого материала,
- 3) факторы, связанные с возникновением вибраций режущего инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

Для определения влияния степени напряжённо-деформированного состояния и режимов резания на шероховатость обработанной поверхности при механической обработке с применением предлагаемой антивибрационной инструментальной системы, были проведены измерения шероховатости после каждого растачивания по плану эксперимента. Измерения проводились высокоточным портативным профилометр TR200 (Рисунок 4.8) (Приложение А) предназначенного для расчёта параметров шероховатости обработанных поверхностей образцов.



Рисунок 4.8 – Измерение шероховатости профилометром TR200

Замер шероховатости экспериментальных образцов, сваренных из стали (Сталь 45 ГОСТ 1050-2013) и нержавеющей стали (12X18H10T ГОСТ 5949-2018), проводился для каждого участка с фиксированным вылетом инструмента равным 0,5 м с различной степенью затяжки (от 60-90 Н·м), режимах резания: $t_{рез} = 0,3$ мм, $S_{рез} = 0,08$ мм/об, $V_{рез} = 160$ м/мин и с помощью различных режущих пластин:

- 1) VBMT 11 03 04-MM 2025;
- 2) VBMT 11 03 04-PF 4315.

Шероховатость измерялась трижды после каждого прохода расточного инструмента с различной степенью напряжённо-деформированного состояния, затем рассчитывались средние значения шероховатости внутренней поверхности. Результаты проведённого эксперимента приведены на Рисунке 4.7.

Для совместной обработки всех элементов сварной конструкции в соответствии с требованием допустимой шероховатости $Ra \leq 1$ мкм с учётом проведённых экспериментов (Рисунок 4.9), предлагается использовать твёрдосплавную пластину марки VBMT 110304-MM 2025.

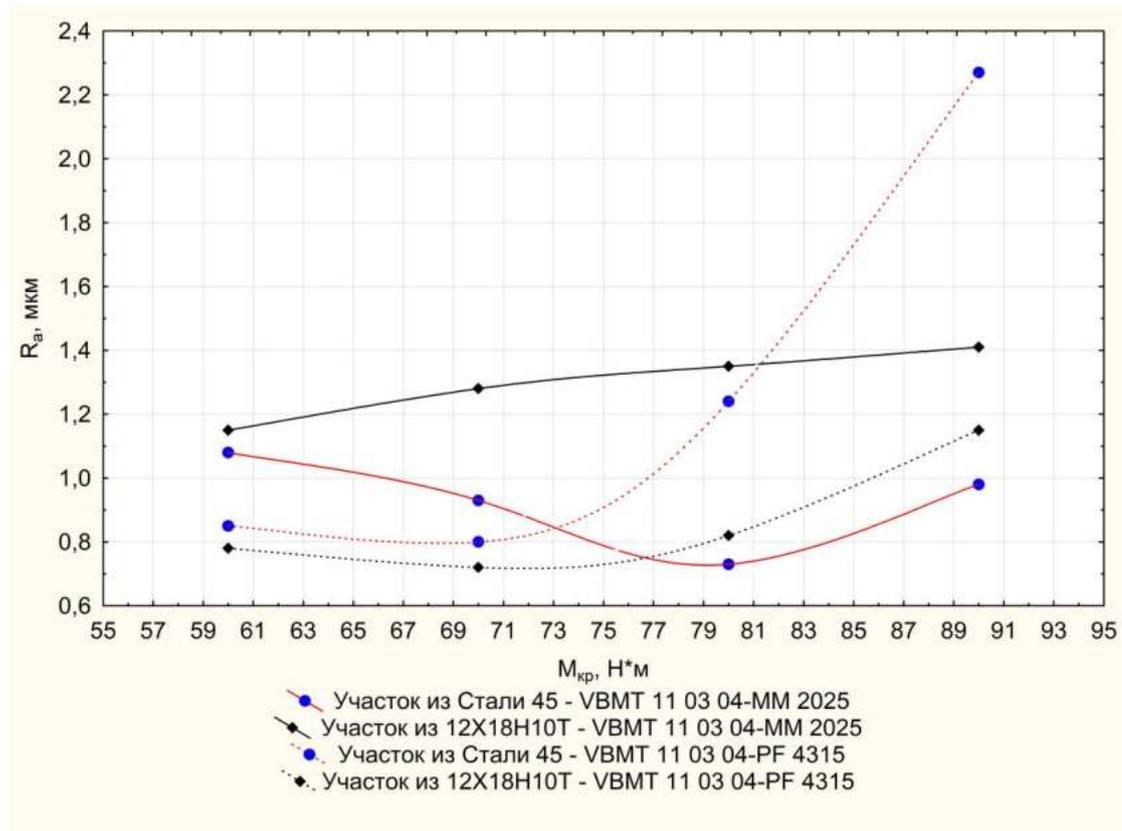
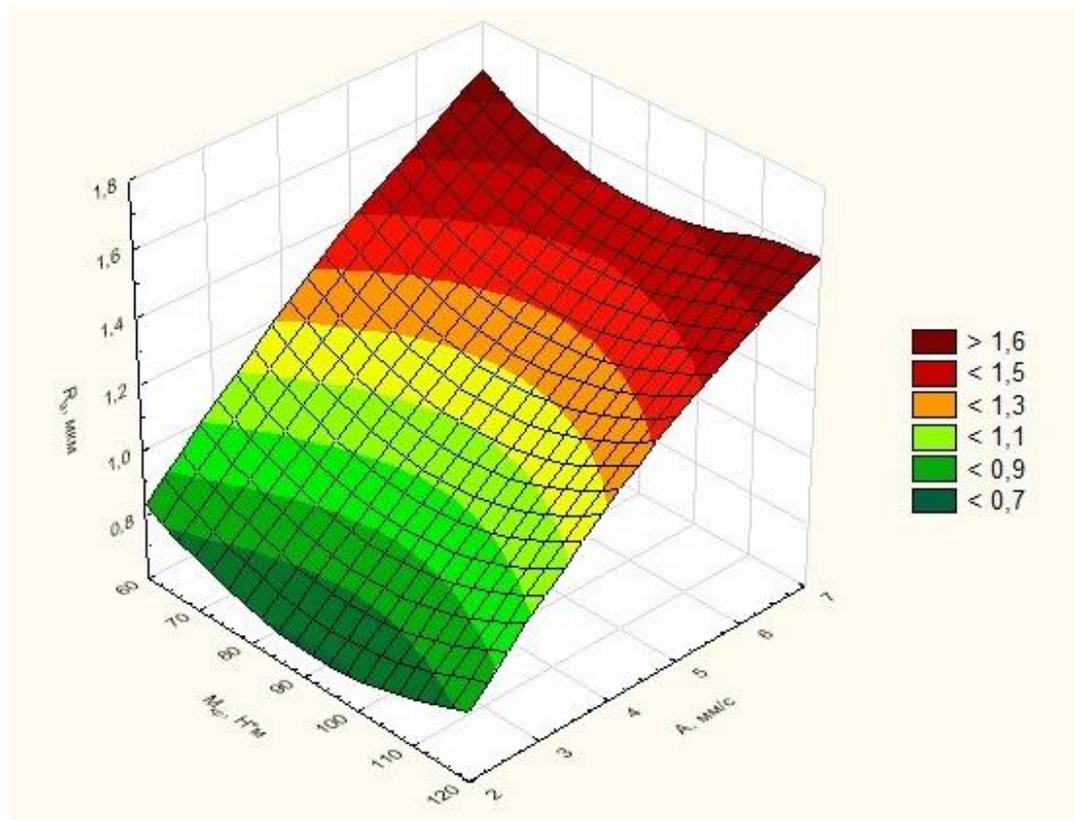
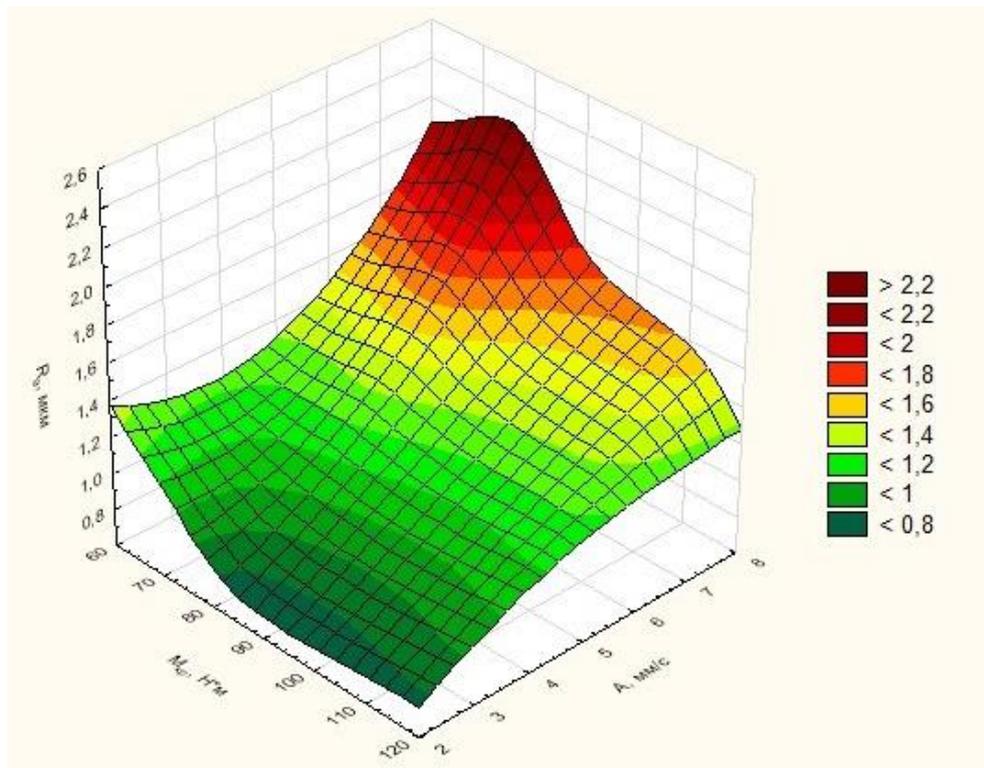


Рисунок 4.9 – Зависимость шероховатости от момента затяжки с использованием соответствующей режущей пластины

Экспериментальную зависимость между шероховатостью поверхности и амплитудой колебаний определяли при обработке образца, сваренного из стали (Сталь 45 ГОСТ 1050-2013) и нержавеющей стали (12X1810Т ГОСТ 5949-2018) с вылетом расточного инструмента равным 0,5 м, режимах резания: $t_{рез} = 0,3$ мм, $S_{рез} = 0,08$ мм/об, $V_{рез} = 160$ м/мин с помощью режущей пластины VBMT 110304-MM 2025. Во время процесса растачивания с помощью вибродиагностической установки «Prüftechnik MT GmbH» фиксировались амплитуды колебаний. Измерение шероховатости проводилось также трижды, и определялась средняя, как и в предыдущем эксперименте. Результаты представлены на Рисунке 4.10.



а – шероховатость поверхности при обработке на участке с 12X18H10Т



б – шероховатость поверхности при обработке на участке со Сталью 45

Рисунок 4.10 – Зависимость шероховатости (на различных участках образцов) от амплитуды колебаний и степени затяжки разжимного конуса

При повышении уровня вибраций режущей кромки ВВМТ 110304-ММ 2025 относительно обработанной внутренней поверхности, очевидно, увеличивается показатели шероховатости обработанной поверхности. Чем значительнее будет амплитуда вибрации, возникающих в процессе резания, тем больше будет шероховатость внутренних прецизионных поверхностей деталей из разнородных материалов.

Следующий этап испытаний был посвящён определению влияния режимов резания на шероховатость обработанной внутренней поверхности.

Экспериментальную зависимость шероховатости поверхности от глубины резания $t_{рез}$ определяли при вылете расточного инструмента 0,5 м и режимах резания: $S_{рез} = 0,08$ мм/об, $V_{рез} = 160$ м/мин – с помощью режущей пластины ВВМТ 110304-ММ 2025 (Рисунок 4.11).

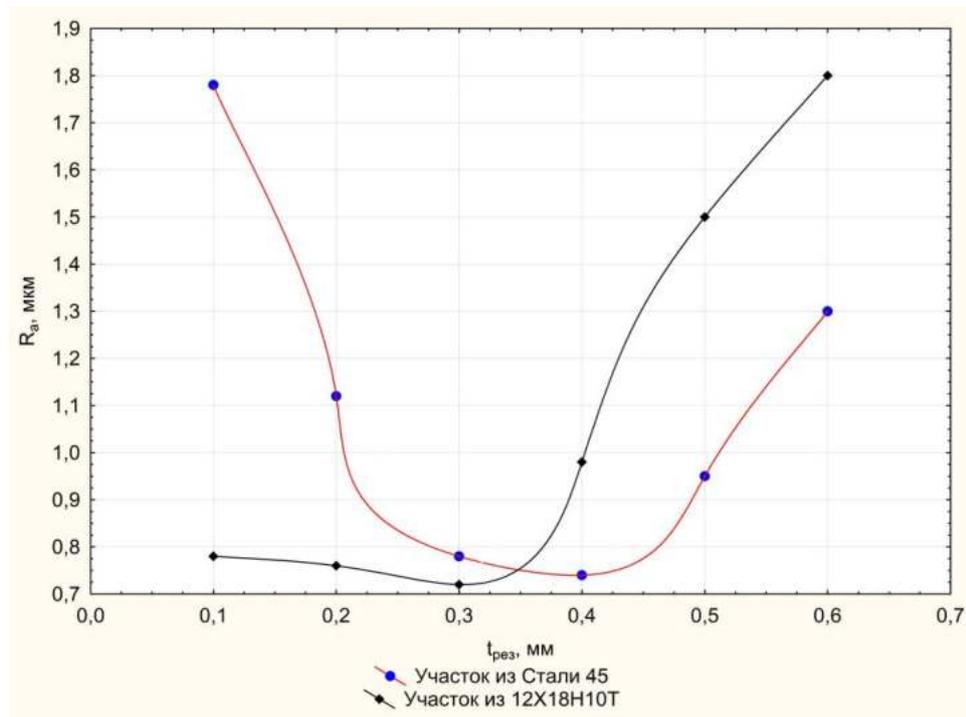


Рисунок 4.11 – Зависимость шероховатости от глубины резания $t_{рез}$

Экспериментальную зависимость шероховатости поверхности от подачи $S_{рез}$ определяли при вылете расточного инструмента 0,5 м и режимах резания: $t_{рез} = 0,35$ мм, $V_{рез} = 160$ м/мин – с помощью режущей пластины ВВМТ 110304-ММ 2025 (Рисунок 4.12).

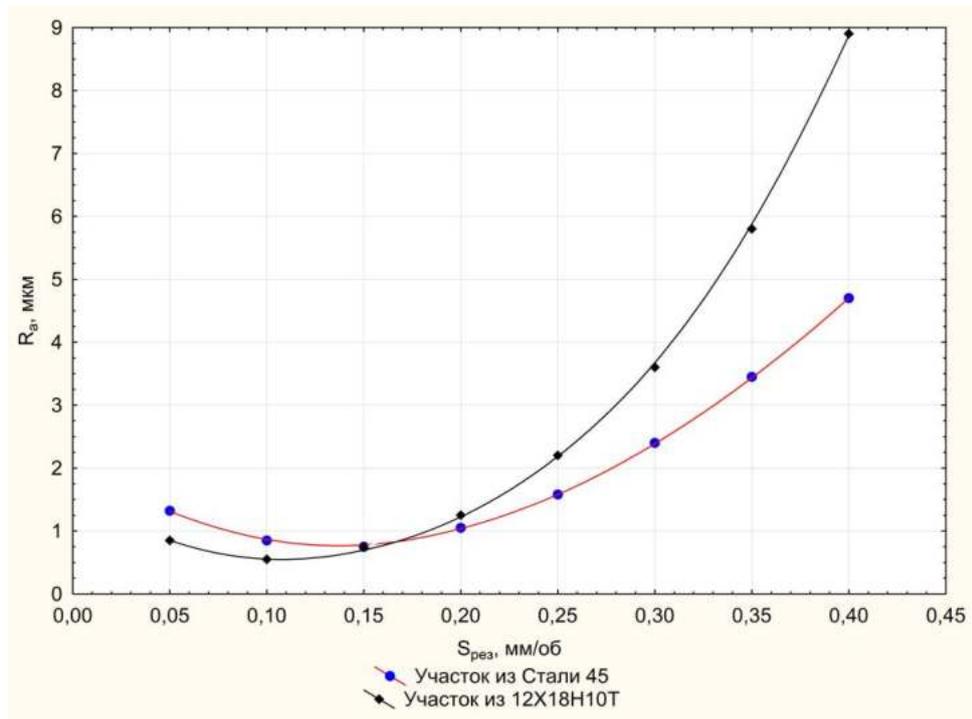


Рисунок 4.12 – Зависимость шероховатости от подачи $S_{рез}$

Экспериментальную зависимость шероховатости поверхности от скорости резания $V_{рез}$ определяли при вылете расточного инструмента 0,5 м и режимах резания: $t_{рез} = 0,35$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об – с помощью режущей пластины VBMT 110304-ММ 2025 (Рисунок 4.13).

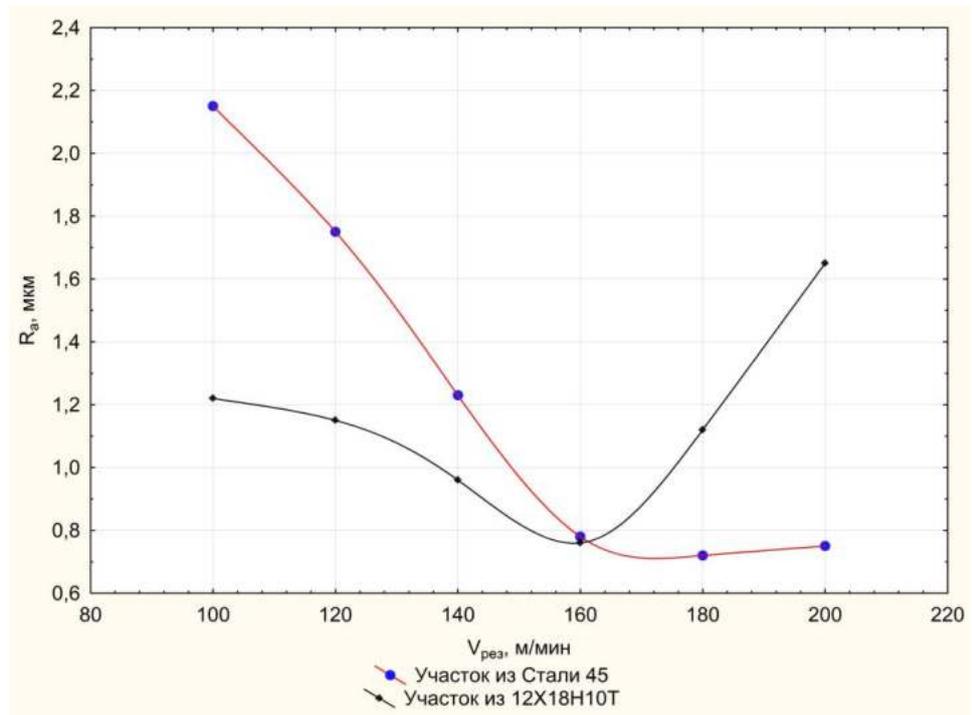


Рисунок 4.13 – Зависимость шероховатости от скорости резания $V_{рез}$

Результаты серии экспериментальных исследований, с учётом проведённого моделирования в LabVIEW 2019 показали, что применение антивибрационной расточной оправки, на чистовых переходах механической обработки при $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$, режимах резания: $t_{рез} = 0,35 \text{ мм}$, $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об}$, $V_{рез} = 160 \text{ м/мин}$ – обеспечивает получение заданной шероховатости поверхности со средним арифметическим отклонением профиля до 1 мкм на всех участках исследуемой сварной детали, состоящей из сталей с различными механическими свойствами.

4.3 Исследования точности растачиваемого отверстия в деталях, сваренных из разнородных сталей

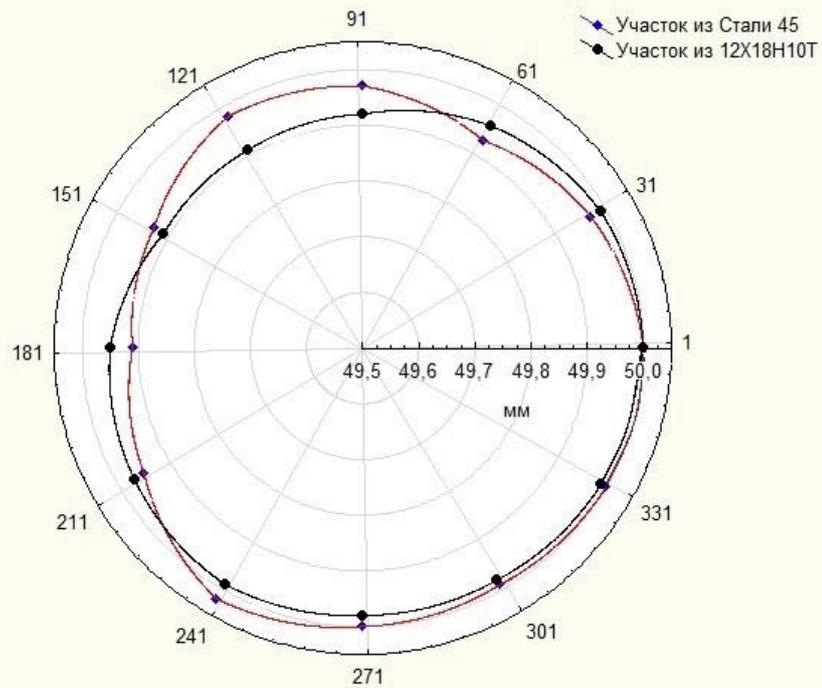
Под воздействием различных факторов, возникающих в процессе резания, смещается вершина режущей пластины от номинальной траектории, что как следствие, ведёт к отклонению формы и расположения обработанного отверстия. Ключевым фактором является колебание глубины резания $t_{рез}$ по углу поворота заготовки – крутильные колебания. При этом возникают упругие отжатия в технологической системе, которые обуславливают достигаемую точность формы и расположения отверстия [13, 50, 51].

Эксперименты по сравнению показателей точности отверстия обработанных образцов, сваренных из стали (Сталь 45 ГОСТ 1050-2013) и нержавеющей стали (12X1810Т ГОСТ 5949-2018), проводились на токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L300C. с использованием напряжённно-деформированной оправки с вылетом расточного инструмента равным 0.5 м при следующим режимах резания и степени напряжённно-деформированного состояния. Представленные ниже комбинации режимных параметров показали наиболее лучший результат:

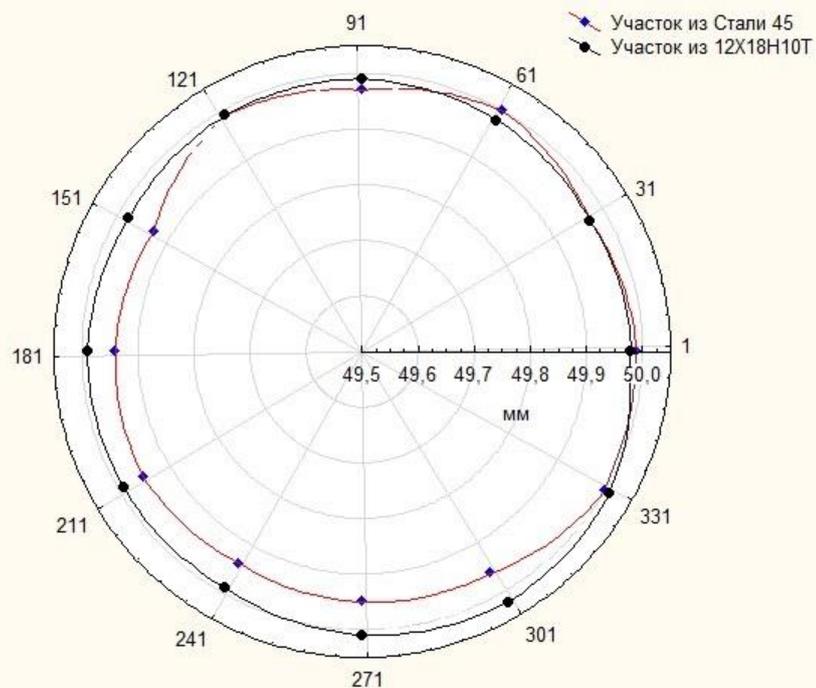
1) Образец №1: $t_{рез} = 0,4 \text{ мм}$, $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об}$, $V_{рез} = 180 \text{ м/мин}$, $M_{крут} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и режущей пластиной VBMT 110304-PF 2025 (Рисунок 4.14 а);

2) Образец №2: $t_{рез} = 0,35$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об, $V_{рез} = 160$ м/мин, $M_{крут} = 90$ Н·м и режущей пластиной VBMT 110304-ММ 2025 (Рисунок 4.14 б);

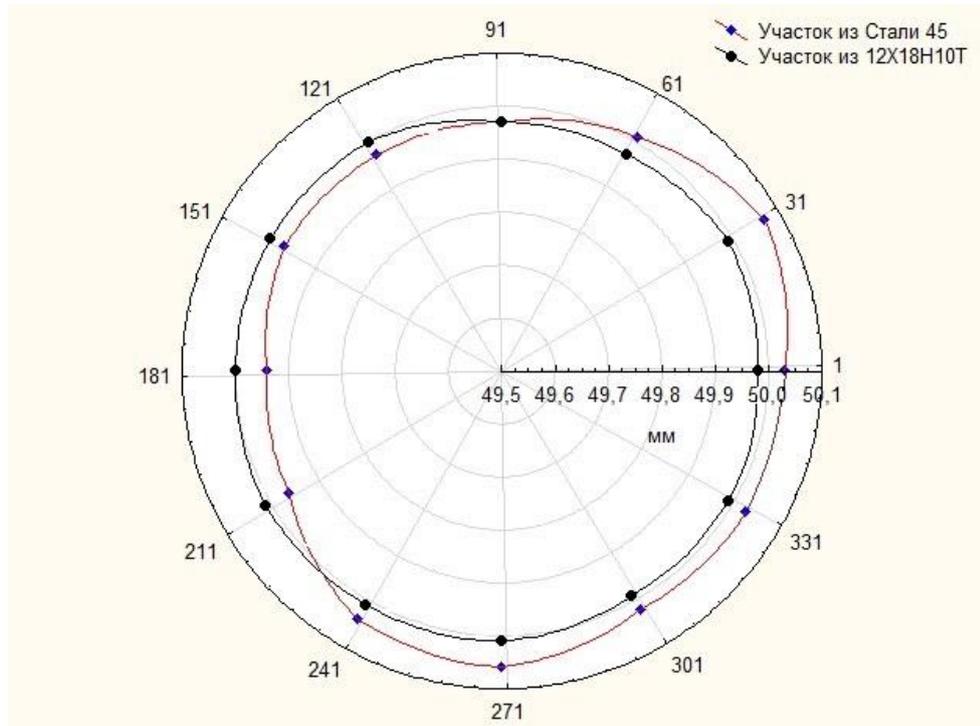
3) Образец №3: $t_{рез} = 0,3$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об, $V_{рез} = 140$ м/мин, $M_{крут} = 90$ Н·м и режущей пластиной VBMT 110304-ММ 2025 (Рисунок 4.14 в).



а) круглограмма образца №1



б) круглограмма образца №2



в) круглограмма образца №3

Рисунок 4.14 – Сравнительный анализ круглограмм образцов



Рисунок 4.15 – Процесс измерения точности отверстия сварного образца

Отклонение от круглости расточенного отверстия производилось индикатором часового типа с магнитной стойкой, установленной на торцевой поверхности блока револьверной головки. Для фиксации отклонений

индикатора по торцу заготовки были нанесены двенадцать отметок (Рисунок 4.15). Измерения проводились по расточенному диаметру в сварных образцах, которые соответствовали разным режимам резания и степени напряжённо-деформированной оправки. Фиксировались максимальные отклонения в каждом из поперечных сечений элементов конструкции. Результаты измерений представлены на Рисунках 4.14

Проведённый сравнительный анализ (Рисунок 4.14) показал, что точность отверстия образца (Рисунок 4.14 б), соответствует требуемому параметру точности (допуск круглости 0,02 мкм) детали «Труба» (Рисунок 1.2). Однако, ввиду различного отжима режущей кромки от обработанной поверхности, связанного с различной обрабатываемостью материалов сварного образца №2, диаметр элемента из нержавеющей стали 12X18Н10Т после непрерывного процесса растачивания получился больше, чем на элементе из Стали 45. В связи с этим, в рекомендациях по технологии растачивания отверстий в сварных деталях, состоящих из разнородных сталей, необходимо провести ряд мер необходимых для уменьшения разности диаметров в пределах допустимой точности отверстия по IT8-9 качеству.

4.4 Рекомендации по технологии изготовления деталей, сваренных из разнородных сталей, с применением напряжённо-деформированной расточной оправки

Разработанная технология с применением напряжённо-деформированной инструментальной системы может использоваться для растачивания глухих или сквозных отверстий диаметром от 48 до 500 мм, длиной до 495 мм в деталях класса втулок при обработке на средних и крупных токарных станках: универсальных или с системой ЧПУ.

Перед началом работы на токарном станке специалисту по наладке необходимо установить корпус расточной оправки в блок револьверной головки станка с ЧПУ через разрезную переходную втулку, что гарантирует

наибольшую стабильность закрепления. Корпус оправки, проворачивая вокруг оси, выставляется так, чтобы вершина режущей пластины точно позиционировалась относительно высоты оси центров станка. Вышеприведённое действие осуществляется либо с помощью выкатывания индикатора по горизонтальным плоскостям оправки, ориентированным по оси X в системе координат станка с ЧПУ, либо с помощью датчика касания, совмещающий центр измерительной площадки с вершиной режущей пластины. Посредством датчика касания или иного известного способа расточной инструмент привязывается к системе координат станка с ЧПУ. Технологический процесс чистового растачивания отверстий в деталях, состоящих из разнородных сталей, реализуется с помощью нескольких получистовых (количество получистовых переходов выбирается в зависимости от предъявляемой точности отверстия) переходов и последующего чистового. Перед первым получистовым переходом необходимо задать расчётную степень напряжённо-деформированного состояния расточной оправки и обеспечить свободный доступ к регулировочной гайке расточного инструмента. Обеспечение свободного доступа необходимо для возможной поднастройки инструмента, в процессе работы станка с ЧПУ. Поднастройка antivибрационного инструмента осуществляется затягиванием регулировочной гайки динамометрическим ключом, тем самым обеспечивая ход разжимного конуса вдоль оси пустотелого корпуса оправки, создавая в периферии расточного инструмента равномерное напряжённо-деформированное состояние, которое повышает динамическую жёсткость инструмента. Перед осуществлением первого получистового перехода на стойке станка с ЧПУ назначаются «перемещение в холостых ходах» на минимум, либо прописываются «паузы» в УП технологического процесса, на некотором расстоянии от обрабатываемой сварной детали в целях безопасности. В случае возникновения вибраций после начала обработки необходимо плавно проворачивать регулировочную гайку по часовой стрелке, тем самым увеличивая степень напряжённо-

деформированного состояния оправки, до момента снижения колебаний в зоне резания. После первого получистового перехода можно закрыть доступ к регулировочной гайке для запуска станка с применением смазочно-охлаждающей жидкости. С использованием специального алгоритма по выбору оптимального припуска, описанного ниже, проводятся получистовые и чистовые переходы операции растачивания с последовательным выходом на необходимую точность отверстия на всей его длине.

4.4.1 Алгоритм по выбору оптимального припуска под механическую обработку отверстий сварных деталей, состоящих из двух элементов

Программирование станков с ЧПУ с помощью макропрограмм позволяют задавать операции с переменными, арифметические и логические операции, а также для нашего конкретного случая, улучшить прохождение УП программы процесса растачивания сварных деталей из разнородных сталей с достижением требуемых значений шероховатости и точности [34]. Так с учётом возможностей и ограничений стойки Fanuc 21i-TD, была написана макропрограмма для осуществления алгоритма по выбору оптимального припуска и опробована на предприятии ООО «НПП «ОРИОН» (Рисунок 4.16).

Целью алгоритма по выбору оптимального припуска является создание программы, позволяющей на этапах безусловного останова оператору станка с ЧПУ, проводить необходимые измерения в характерных точках прецизионного отверстия и вводить полученные данные в текст УП станка с ЧПУ, исключая человеческий фактор при осуществлении процесса растачивания.



Рисунок 4.16 – Оператор вводит данные в алгоритм по выбору оптимального припуска с помощью стойки Fanuc токарного обрабатывающего центра Hyundai WIA L300C

Макропрограмма состоит из макрокоманд, осуществляющих управление органами станка с ЧПУ с учётом введённых оператором данных (диаметры отверстия на различных участках во внутренней полости обрабатываемой детали) и повышает точность расточенного отверстия. В алгоритме присутствуют специальные блоки защиты (таблица 4.1) исключающие ошибки при вводе данных в УП станка с ЧПУ.

Таблица 4.1 – Алгоритм по выбору оптимального припуска под механическую обработку отверстий сварных деталей, состоящих из двух элементов

УП разработанного алгоритма	Описание блока
% O1001 (RASTACHIVSNIE) (3 ELEMENTA);	Название программы в системе стойки Fanuc
#1=160 (V, M/MIN) #2=0.08 (S, MM/R) #3=0.3 (T, MM) #4=40.02 (DIAMETR)	Ввод характеристик обрабатываемой детали (записываемые оператором станка с ЧПУ)

#5= 0 (CHARACTER TOCHKA №1) #6= -50 (CHARACTER TOCHKA №2) #7= -100 (CHARACTER TOCHKA №3) #8= -150 (CHARACTER TOCHKA №4) #9= -200 (CHARACTER TOCHKA №5) #10= -250 (CHARACTER TOCHKA №6);	
G23G54G40G97G99; G28U0; G0Z100.;	Строка безопасности
IF [#1 LE 140] GOTO 11; IF [#1 GE 200] GOTO 11; IF [#2 LE 0.06] GOTO 12; IF [#2 GE 0.12] GOTO 12; IF [#3 LE 0.2] GOTO 13; IF [#4 GE 0.5] GOTO 13; IF [#6 LE #7] GOTO 14; IF [#7 LE #8] GOTO 15; IF [#8 LE #9] GOTO 16; IF [#9 LE #10] GOTO 17; IF [#10 GE 0] GOTO 18; N11 #3000=1 (PROVER V); N12 #3000=2 (PROVER S); N13 #3000=3 (PROVER T); N14 #3000=4 (PROVER TOCHKA 6); N15 #3000=5 (PROVER TOCHKA 7); N16 #3000=6 (PROVER TOCHKA 8); N17 #3000=7 (PROVER TOCHKA 9); N18 #3000=8 (PROVER TOCHKA 10);	Блок защиты данных
T0606 (NALADOCH); G50 S1000 M08; G96 S#1 M03; G0 X [#4+10] Z3.; G41 G1 X [#4+0.8] Z0 F#2; G1 X [#4-4*#3] Z [-2*#3] G1 X [#4-4*#3] Z-#6; G1 X [#4-4*#3] Z-#7; G1 X [#4-4*#3] Z-#8; G1 X [#4-4*#3] Z-#9; G1 X [#4-4*#3] Z-#10; G1 X [#4-8*#3]; G40; G0 Z50.; G28U0; M00	УП первого получистового перехода
(VVEDITE DIAMETR) (NALADOCH) #11= 0 (CHARACTER TOCHKA №1) #12= 0 (CHARACTER TOCHKA №2) #13= 0 (CHARACTER TOCHKA №3) #14= 0 (CHARACTER TOCHKA №4)	Блок ввода данных (записываемые оператором станка с ЧПУ)

<p>#15= 0 (CHARACTER TOCHKA №5) #16= 0 (CHARACTER TOCHKA №6); ;</p>	
<p>IF [#11 LE [#4-5*#3]] GOTO 19; IF [#11 GE [#4-3*#3]] GOTO 19; IF [#12 LE [#4-5*#3]] GOTO 20; IF [#12 GE [#4-3*#3]] GOTO 20; IF [#13 LE [#4-5*#3]] GOTO 21; IF [#13 GE [#4-3*#3]] GOTO 21; IF [#14 LE [#4-5*#3]] GOTO 22; IF [#14 GE [#4-3*#3]] GOTO 22; IF [#15 LE [#4-5*#3]] GOTO 23; IF [#15 GE [#4-3*#3]] GOTO 23; IF [#16 LE [#4-5*#3]] GOTO 24; IF [#16 GE [#4-3*#3]] GOTO 24; N19 #3000=9 (PROVER DIAMETR №1); N20 #3000=10 (PROVER DIAMETR №2); N21 #3000=11 (PROVER DIAMETR №3); N22 #3000=12 (PROVER DIAMETR №4); N23 #3000=13 (PROVER DIAMETR №5); N24 #3000=14 (PROVER DIAMETR №6); ;</p>	<p>Блок защиты данных</p>
<p>T0606 (POLUCHIST); G50 S1000 M08; G96 S#1 M03; G0 X [#4+10] Z3.; G41 G1 X [#4+0.8] Z0 F#2; G1X [#4-2*#3+ [#4-4*#3- #11]] Z-#3 G1X [#4-2*#3+ [#4-4*#3- #12]] Z-#6; G1 X [#4-2*#3+ [#4-4*#3- #13]] Z-#7; G1 X [#4-2*#3+ [#4-4*#3- #14]] Z-#8; G1 X [#4-2*#3+ [#4-4*#3- #15]] Z-#9; G1 X [#4-2*#3+ [#4-4*#3- #16]] Z-#10; G1 X [#4-6*#3]; G40; G0 Z50.; G28 U0; M00;</p>	<p>УП Получистового перехода</p>
<p>(VVEDITE DIAMETR) (POLUCHIST); #11= 0 (CHARACTER TOCHKA №1); #12= 0 (CHARACTER TOCHKA №2); #13= 0 (CHARACTER TOCHKA №3); #14= 0 (CHARACTER TOCHKA №4); #15= 0 (CHARACTER TOCHKA №5); #16= 0 (CHARACTER TOCHKA №6);</p>	<p>Блок ввода данных (записываемые оператором станка с ЧПУ)</p>
<p>IF [#11 LE [#4-3*#3]] GOTO 19; IF [#11 GE [#4- #3]] GOTO 19; IF [#12 LE [#4-3*#3]] GOTO 20; IF [#12 GE [#4-#3]] GOTO 20; IF [#13 LE [#4-3*#3]] GOTO 21;</p>	<p>Блок защиты данных</p>

IF [#13 GE [#4-#3]] GOTO 21; IF [#14 LE [#4-3*#3]] GOTO 22; IF [#14 GE [#4-#3]] GOTO 22; IF [#15 LE [#4-3*#3]] GOTO 23; IF [#15 GE [#4-#3]] GOTO 23; IF [#16 LE [#4-3*#3]] GOTO 24; IF [#16 GE [#4-#3]] GOTO 24;	
T0606 (CHIST); G50 S1000 M08; G96 S#1 M03; G0 X [#4+10] Z3.; G41 G1 X [#4+0.8] Z0 F#2; G1 X [#4+ [#4-2*#3- #11]] Z-#3 G1 X [#4+ [#4-2*#3- #12]] Z-#6; G1 X [#4+ [#4-2*#3- #13]] Z-#7; G1 X [#4+ [#4-2*#3- #14]] Z-#8; G1 X [#4+ [#4-2*#3- #15]] Z-#9; G1 X [#4+ [#4-2*#3- #16]] Z-#10; G1 X [#4-4*#3]; G40; G0 Z50.; G28 U0; M01; ; M30;	УП Чистового перехода

В конце каждого перехода оператором станка с ЧПУ проводится измерение точности отверстия и корректируется программа обработки, в случае отклонений реальной траектории перемещения расточного инструмента и запрограммированной в УП технологического процесса. После данных корректировок УП обработки проводится чистовое растачивания отверстия, а затем с помощью измерительных средств проверяются обработанные внутренние поверхности на точность и шероховатость поверхности. При последующей обработке партии деталей не проводится поднастройка расточного инструмента, а лишь контролируется износ режущей пластины по задней поверхности. Следовательно, для стабильного процесса растачивания с обеспечением предъявляемой шероховатости ($Ra \leq 1$ мкм) и точности по IT8-9 растачивания необходимо два перехода: чистовой и получистовой –при общем исходном припуске на обработку $\delta_{\text{общ}}=0,7$ мм

4.5 Сравнение результатов производительности при использовании базовой технологии и совершенствованной технологии с применением напряжённо-деформированного расточного инструмента

Расточной инструмент является наименее жёстким элементом технологической системы ввиду особенностей процесса растачивания, при котором расточная оправка осуществляет обработку с большим вылетом. Очевидно, рекомендуется применять расточной инструмент с минимально возможным вылетом и максимальным сечением оправки для снижения амплитуд колебаний. Однако вылет расточного инструмента прежде всего обусловлен глубиной обрабатываемого отверстия, а увеличение диаметра оправки ограничено как диаметром обрабатываемого отверстия, так и параметрами станочного оборудования для закрепления осевого инструмента. Последствием указанных выше особенностей является низкая жёсткость инструмента и слабая виброустойчивость процесса растачивания. Это приводит к снижению стойкости режущих пластин, осуществляющих непрерывную обработку всех участков сварной детали, состоящей из разнородных сталей.

За базовый метод растачивания отверстий в сварных деталях был взят технологический процесс растачивания отверстия в детали «Труба» на предприятии ООО «НПП «Орион». При растачивании детали «Труба» (Рисунок 1.2) на горизонтальном токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L300C с использованием антивибрационного инструмента Silent Tools возникли ряд проблем, связанных с разнородностью сварной конструкции и особенностью применяемого расточного инструмента. Из-за высокой интенсивности вибраций на границе перехода инструмента из одного материала в другой, процесс растачивания отверстия был разделён на участки, соответствующие каждому элементу обрабатываемой сварной конструкции. К каждому элементу отверстия детали были назначены полустовые и чистовые переходы операции растачивания, осуществление которых

требовало высокой квалификации персонала. Базовая технология представлена в Приложении Е и в Таблице 4.2.

Совершенствованная технология с применением специального инструментального оснащения с фиксированным напряжённо-деформированном состоянии осуществляется на базе токарного обрабатывающего центра Hyundai WIA L300С. Высокие диссипативные показатели предлагаемой расточной оправки позволяют непрерывно обрабатывать комбинированные из разнородных сталей детали, обеспечивая заданные показатели шероховатости и точности внутренних прецизионных поверхностей. На операциях полуставовой операции, ввиду различного отжима режущей кромки от обрабатываемой поверхности при прохождении разнородных материалов, необходимо вводить соответствующие корректировки в УП для гарантированного удовлетворения требованиям точности отверстия. Совершенствованная технология укрупнённо представлена в Приложении Ж и в Таблице 4.2

Проведём сравнение трудоёмкости операций, согласно методике [46] по базовой и совершенствованной технологии изготовления детали «Труба» (Рисунок 1.2), по формуле (4.1), с режимами резания, соответствующие каждому переходу и приведёнными в Таблице 4.1:

$$T_0 = T_{\text{маш}1} + T_{\text{маш}2} + T_{\text{маш}3} + \dots + T_{\text{маш}n}, \quad (4.1)$$

где T_0 – основная трудоёмкость;

$T_{\text{маш}}$ – трудоёмкость каждой операций.

Основная трудоёмкость T_0 это время, необходимое на изменение размеров, формы, состояния или других свойств заготовки в процессе обработки.

Таблица 4.2 – Сравнение трудоёмкости базовой с совершенствованной технологией растачивания отверстия в детали «Груба» (Рисунок 1.2)

Элемент конструкции	Переход	Режимы резания	Основная трудоёмкость T_0 , мин	Весомое-тельное время $T_{вз}$, мин	Оперативная сумма $T_{оп}$, мин	Штучная трудоёмкость $T_{шт}$, мин	Штучная калькуляционная трудоёмкость $T_{шт.к}$, мин
Базовая технология растачивания							
1-й элемент конструкции	1. Полуцистовой переход	$t_{рез} = 0,4 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,1 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 150 \text{ мм/мин}$	2,88	0,87	3,75	4,32	5,32
	2. Чистовой переход	$t_{рез} = 0,4 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,1 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 150 \text{ мм/мин}$	2,88	0,87	3,75	4,32	5,32
2-й элемент конструкции	1. Полуцистовой переход	$t_{рез} = 0,4 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 200 \text{ мм/мин}$	0,27	0,08	0,35	0,41	1,41
	2. Чистовой переход	$t_{рез} = 0,4 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 200 \text{ мм/мин}$	0,27	0,08	0,35	0,41	1,41
3-й элемент конструкции	1. Полуцистовой переход	$t_{рез} = 0,4 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,1 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 150 \text{ мм/мин}$	1,09	0,33	1,42	1,63	2,63
	2. Чистовой переход	$t_{рез} = 0,4 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,1 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 150 \text{ мм/мин}$	1,09	0,33	1,42	1,63	2,63
Суммарное значение						18,72	
Совершенствованная технология растачивания							
Все элементы конструкции	1. Полуцистовая переход	$t_{рез} = 0,35 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 160 \text{ мм/мин}$	3,45	1,03	4,49	5,16	6,16
	2. Чистовая переход	$t_{рез} = 0,35 \text{ мм};$ $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об};$ $V_{рез} = 160 \text{ мм/мин}$	3,45	1,03	4,49	5,16	6,16
Суммарное значение						12,32	

Значения $T_{\text{маш}}$ для каждой токарной операций полустогового и чистового растачивания определялись по формуле (4.2):

$$T_{\text{маш}} = \frac{\pi \cdot L \cdot D}{1000 \cdot S_{\text{рез}} \cdot V_{\text{рез}}}, \quad (4.2)$$

где L – длина рабочего хода, мм; $V_{\text{рез}}$ скорость резания м/мин; $S_{\text{рез}}$ – подача, мм/об; D – обрабатываемый диаметр, мм;

Вспомогательное время $T_{\text{в}}$ определяем по формуле (4.3):

$$T_{\text{в}} = 0,3 * T_0 \quad (4.3)$$

Вспомогательное время $T_{\text{в}}$ – это время, необходимое на установку и снятие заготовок, на закрепление и открепление заготовок, измерение и перемещение заготовок, подвод и отвод инструмента. Часто на практике вспомогательное время определяют по формуле (4.3)

Оперативная сумма $T_{\text{оп}}$ рассчитывается по формуле (4.4):

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{в}} + T_0, \quad (4.4)$$

Штучную трудоёмкость $T_{\text{шт}}$ можно посчитать с помощью формулы (4,5):

$$T_{\text{шт}} = 1,15 * T_{\text{оп}}, \quad (4.5)$$

Найдём значение штучной калькуляционной трудоёмкости $T_{\text{шт.к}}$ по формуле (4.6), считая подготовительно-заключительное время на партию изготавливаемой продукции $T_{\text{пз}} = 1$ мин:

$$T_{\text{шт.к}} = T_{\text{шт}} + T_{\text{пз}}, \quad (4.6)$$

Сравнительный анализ трудоёмкостей базовой и совершенствованной технологии растачивания внутреннего прецизионного отверстия в детали «Труба», состоящего из разнородных материалов показал, что с учётом малой дискретности технологического процесса с использованием расточной державки в фиксированном напряжённо-деформированном состоянии, наблюдается снижение трудоёмкости процесса на 34,2 % по сравнению с базовым технологическим процессом

4.6 Выводы по четвёртой главе

1. Ряд проведённых экспериментальных и теоретических исследований позволил определить граничные условия устойчивости процесса растачивания отверстий и назначить оптимальные режимы для разработанного метода при различных параметрах механической обработки.

2. Выполненный анализ результатов серии испытаний, с учётом проведённого моделирования в LabVIEW 2019, показал, что применение антивибрационной расточной оправки на чистовых переходах механической обработки отверстий при силе затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$, режимах резания: $t_{рез} = 0,35 \text{ мм}$, $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об}$, $V_{рез} = 160 \text{ м/мин}$ с твёрдосплавной пластинкой марки VBMT 110304-ММ 2025 – обеспечивает получение заданной шероховатости поверхности со средним арифметическим отклонением профиля до 1 мкм на всех участках исследуемой сварной детали, состоящей из сталей с различными механическими свойствами.

3. Результаты сравнительных испытаний показали, что точность отверстия образца соответствует требуемому параметру точности (допуск круглости 0,02 мкм) детали «Труба». Однако, ввиду различного отжима режущей кромки от обработанной поверхности, связанного с различной обрабатываемостью материалов, диаметр элемента из нержавеющей стали 12X18Н10Т после непрерывного процесса растачивания получился больше, чем на элементе из Стали 45.

4. Разработан и реализован на практике алгоритм, осуществляющий интегрированную технологическую операцию с помощью макропрограммирования в системе CNC типа Fanuc 21i-TD, включающий два технологических перехода: чистовой и получистовой – при общем исходном припуске на обработку $\delta_{общ} = 0,7 \text{ мм}$, для уменьшения разности диаметров каждого участка сварной детали в пределах допустимой точности отверстия по IT8-9,

5. Сравнительный анализ трудоёмкостей базовой и совершенствованной технологии растачивания внутреннего прецизионного отверстия в детали «Труба», состоящего из разнородных материалов показал, что с учётом малой дискретности технологического процесса с использованием расточной державки в фиксированном напряжённо-деформированном состоянии, наблюдается снижение трудоёмкости процесса на 34,2 % по сравнению с базовым технологическим процессом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно - квалификационную работу, в которой предлагается новое решение актуальной научной задачи - технологическое обеспечение шероховатости и точности внутренних прецизионных поверхностей деталей, сваренных из разнородных сталей, на основе использования предварительно-напряжённого состояния расточной оправки для снижения интенсивности колебательных процессов.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Установлены основные закономерности изменения параметров качества и точности прецизионных поверхностей при растачивании отверстий в сварных деталях из разнородных сталей.

2. Разработан способ технологического обеспечения макро- и микрогеометрических параметров внутренних прецизионных поверхностей при растачивании отверстий в деталях, сваренных из разнородных сталей, посредством использования специального инструмента, обладающего диссипативными свойствами.

3. Разработано и предложено устройство расточной оправки, находящейся в определённом фиксированном напряжённо-деформированном состоянии, для подавления возникающих возмущений в процессе растачивания разнородных обрабатываемых сталей и обеспечения качественных показателей поверхности детали (Приложение В).

4. Построена двухконтурная математическая модель на основе дифференциальных уравнений Лагранжа 2-го рода, которая описывает процесс движения в нормальном и касательном контуре расточной поправки с учётом параметров приведённой массы m , диссипативных сил b и жёсткости c .

5. Предложен механизм учёта напряжённо-деформированного состояния антивибрационной расточной оправки в системе линейных

дифференциальных уравнений, который осуществляется за счёт изменения динамических параметров: демпфирования; жёсткости; приведённой массы

6. В математическую модель процесса растачивания введён тумблер (переключатель), учитывающий особенности механических свойств сварной детали как последовательную смену параметров со значениями $S\{P_{45}, Q_{45}, L_{45}^P, L_{45}^Q, S_{45}^P, S_{45}^Q, S_{45}^{ky1}, S_{45}^{ky2}, S_{45}^{kyx}, k_{45}, \gamma_{45}^{90}, A_{45}^{90}, f_{45}, \varepsilon_{45}\}$ на первом участке, $N\{P_x \rightarrow 0, Q_y \rightarrow 0, \}$ на границе раздела двух сталей, до $S_3\{P_{12}, Q_{12}, L_{12}^P, L_{12}^Q, S_{12}^P, S_{12}^Q, S_{12}^{ky1}, S_{12}^{ky2}, S_{12}^{kyx}, k_{12}, \gamma_{12}^{90}, A_{12}^{90}, f_{12}, \varepsilon_{12}\}$ на втором участке.

7. Установлен положительный эффект от использования антивибрационной расточной оправки (при $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$) на устойчивость процесса растачивания при имитационном моделировании в программной среде NI LabVIEW 2019, что позволяет на чистовом переходе достичь снижения амплитуды колебаний на границе раздела двух материалов на 69 % по сравнению с соответствующими вибрациями при реализации базового технологического процесса растачивания.

8. Проведённый анализ результатов серии испытаний, с учётом проведённого моделирования в LabVIEW 2019, показал, что применение антивибрационной расточной оправки, на чистовых переходах механической обработки отверстий при моменте затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 90 \text{ Н} \cdot \text{м}$, режимах резания: $t_{рез} = 0,35 \text{ мм}$, $S_{рез} = 0,12 \text{ мм/об}$, $V_{рез} = 160 \text{ м/мин}$ с твёрдосплавной пластинкой марки VBMT 110304-ММ 2025 – обеспечивает получение заданной шероховатости поверхности со средним арифметическим отклонением профиля до 1 мкм на всех участках исследуемой сварной детали, состоящей из сталей с различными механическими свойствами.

9. Разработан и реализован на практике алгоритм, осуществляющий интегрированную технологическую операцию с помощью макропрограммирования в системе CNC типа Fanuc 21i-TD, включающий два технологических перехода: чистовой и получистовой –при общем исходном

припуске на обработку $\delta_{\text{общ}}=0,7$ мм, для обеспечения допустимой точности отверстия по IT8-9 и допуску круглости до 0,02 мкм.

10. Установлено снижение трудоёмкости процесса на 34,2 % по сравнению с базовым технологическим процессом, по причине малой дискретности технологического процесса с использованием разработанной расточной оправки в фиксированном напряжённо-деформированном состоянии.

11. Даны рекомендации и сформулированы перспективы развития совершенствованной технологии растачивания внутренних цилиндрических поверхностей сварных деталей из разнородных сталей, связанные с расширением номенклатуры обрабатываемых сталей и совершенствованием технологической оснастки с целью увеличения эффективности инновационной оправки и на меньших вылетах инструмента.

12. Разработанный и предложенный усовершенствованный технологический процесс изготовления детали «Труба», сваренного из разнородных сталей с применением напряжённо-деформированной расточной оправки, позволяет гарантировано обеспечивать стабильность колебательного процесса технологической системы при непрерывном растачивании внутренней полости сваренной детали из разнородных сталей. Апробирование данного технологического решения проводилось в учебном процессе при обучении магистров по направлению 15.04.01 – «Машиностроение», по программе подготовке «Технология автоматизированного машиностроения» по дисциплине «Научные основы современного машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (Приложение Г), и перспективных предприятий (Приложение Д), подтверждающие положительный результат данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амосов, И.С. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке / И.С. Амосов, В.А. Скраган. – Л.: Машгиз, 1953. – 67 с.
2. Анкудинов, В.Е. Компьютерное моделирование процессов переноса и деформации в сплошных средах: Учеб. пособие: 1–е издание / В.Е. Анкудинов, Д.Д. Афлятунова, М.Д. Кривилев, Г.А Гордеев. – Ижевск: Изд-во Удмуртский университет, 2014. – 108 с.
3. Армарего, И. Дж. А. Обработка металлов резанием / И. Дж. А. Армарего, Р.Х. Браун. – М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
4. Аршинов, В.А. Резание металлов и режущие инструменты / В.А. Аршинов, Г. А. Алексеев.– М.: Машиностроение, 1975.– 436 с.
5. Баранчиков, В.И. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник / В.И. Баранчиков, А.В. Жаринов, Н.Д. Юдина и др.; Под общ. ред. В.И. Баранчикова – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
6. Бармин, Б.П. Вибрации и режимы резания / Б.П. Бармин. – М.: Машиностроение, 1979. – 72 с.
7. Безъязычный, В.Ф. Расчёт режимов резания: Учеб. пособие / В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов, А.В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.
8. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.
9. Бородкин, Н.Н. Проектирование режущего инструмента с корпусами из нетрадиционных материалов: монография / С.А. Васин, Л. А. Васин, Н.Н. Бородкин. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. – 130 с.
10. Бржозовский, Б.М. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин и др.; СГТУ – Саратов: издательство СГТУ, 2008. – 312 с.
11. Брунштейн, Б.Е. Токарное дело / В.И. Дементьев, Б.Е. Брунштейн, - М.: Высшая школа, 1987. – 491 с.

12. Бутен, Н.В. Теория колебаний / Н.В. Бутенин. – М.: Высшая школа, 1963. – 187 с.
13. Васильков, Д.В. Динамика технологической системы механической обработки. / СПб.: ТОО “Инвентекс”, 1997. – 230 с.
14. Васильков, Д.В. Моделирование процесса стружкообразования на основе кусочно – линейной аппроксимации / Д.В. Васильков, В.Л. Вейц. // СПбИмаш – 1998. – №1. – С. 16 – 21.
15. Васин, С.А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании / С.А. Васин – М.: Машиностроение, 2006. – 384 с.
16. Васин, С.А. Резание материалов: Термодинамический подход к системе взаимосвязей при резании / С.А. Васин, А.С. Верещака, В.С. Кушнер – М.: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. – 448 с.
17. Вейц, В.Л. Динамика и управление процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке / В.Л. Вейц, В.В. Максаров. – СПб.: СЗПИ, 2000. – 160 с.
18. Вейц, В.Л. Об упрощённой динамической модели технологической системы механической обработки резанием. Ч.2: Исследование параметрического влияния / В.Л. Вейц, В.В. Максаров // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. – СПб.: СЗПИ, 1999. – №17 – С. 10 –17.
19. Вейц, В.Л. Повышение устойчивости технологической системы при управлении реологическими параметрами процесса стружкообразования / В.Л. Вейц, В.В. Максаров. // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. Вып. 16. – СПб.: СЗПИ, 1999. – С. 19 – 29.
20. Взрывозащищённые электромагнитные клапаны: каталог ЗАО «Криогенная Технология» - М.: ЗАО «Криогенная Технология», 2006 – 25 с.
21. Вибрации в технике: Справочник. В 6т. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана — М.: Машиностроение, 1979. – 351 с.

22. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Колебания машин, конструкций и их элементов / Под ред. Ф.М. Диментберга и К.С. Колесникова – М.: Машиностроение, 1980. – Т.3. – 544 с.
23. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана – М.: Машиностроение, 1979. – Т.2. – 351 с.
24. Влияние кристаллографической текстуры на коэффициент нормальной пластической анизотропии ГПУ–металлов / Е.Ю. Поликарпов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. 1990. № 2. С. 103–108.
25. Вульф, А. М. Резание металлов / А.М. Вульф. – Л.: Машиностроение, 1973. – 496 с.
26. Гороленко, А.О. Инженерия криволинейных поверхностей трения. – Справочник. Инженерный журнал № 10, 2001 – С. 25-26.
27. Грановский, Г.И. О методике измерения и критерии износа режущих инструментов / Г.И. Грановский. // Вестник машиностроения, 1963. – №9.
28. Грановский, Г.И. Резание металлов / Г.И. Грановский. – М.: Высш. шк., 1985. – 304 с.
29. Григорьев С.Н. Инструментальная оснастка станков с ЧПУ / Григорьев С. Н., Кохомский М.В., Маслов А.Р. – М.: Машиностроение, 2006. – 544 с.
30. Григорьев, С.Н. Обработка резанием в автоматизированном производстве: учебное пособие / Григорьев С.Н., Маслов А.Р. – М.: Машиностроение, 2008. – 330 с
31. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
32. Гуревич, Я.Л., Режимы резания труднообрабатываемых материалов / Я.Л. Гуревич, М.Е. Горохов, В.И. Захаров и др. Справочник. 2–е изд., перераб и доп. –Л. Машиностроение, 1986. – 240 с.

33. Дроздов, Н.А. К вопросу о вибрациях станка при токарной обработке / Н.А. Дроздов // Станки и инструмент, 1937. – №2. – С. 21 – 25.
34. Евгениев, Г.Б. Основы программирования обработки на станках с ЧПУ / Г.Б. Евгениев – М.: Машиностроение, 1983. – 304 с.
35. Евдокимов, Ю.А. Планирование и анализ экспериментов при решении задач трения и износа / Ю.А. Евдокимов, В.И. Колесников, А.И. Тетерин. – М.: Наука, 1980. – 228 с.
36. Емельянов, Ю.В. Повышение эффективности токарной обработки сложнопрофильных деталей на станках с ЧПУ путём назначения функционально изменяемого режима резания Дисс. ... канд. техн. наук - Рыбинск: РГАТА им. Соловьева, 2003 – 279 с.
37. Ефимов, А.Е. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностного слоя на основе моделирования переходных процессов / В.В. Максаров, Р.В. Вьюшин, А.Е. Ефимов // Металлообработка. – 2017. – №2. – С. 39–45.
38. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом/ Л.: Машиностроение, –1986. – 184 с
39. Жуков, Э.Л. Основы технологии машиностроения. Этапы проектирования и точность технологических процессов: учеб. пособие / Э.Л. Жуков, А.Г. Схиртладзе, А. М. Соловейчик, И. И. Козарь, Б. Я. Розовский, В. В. Дегтярев// под общ. ред. С. Л. Мурашкина. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 408 с.
40. Зарс, В.В. Вопросы самовозбуждения вибраций металлорежущих станков / В.В. Зарс. – дис. докт. техн. наук – Л.: ЛПИ, 1972. – 238 с.
41. Зубарев, Ю.М. Современные инструментальные материалы: Учебник. – СПб.: Лань, 2008. – 224 с.
42. Ильницкий, И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий – М.: Машгиз, 1958. – 142 с.

43. Каплун, А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
44. Каширин, А.И. Исследование вибраций при резании металлов / А.И. Каширин. – М. – Л.: АН СССР, 1944. – 232 с.
45. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
46. Кирсанов, Д.В. Режущий инструмент: Учебник для вузов/ Д.В. Кирсанов, В.А. Гречишников, С.В. Кирсанов, В.И. Коварев, А.Г. Свиртхалидзе. М.: Машиностроение, 2007.-528 с
47. Козлов, В.А. Прогнозирование точности обработки и характеристик качества поверхностного слоя при точении материалов / РГАТА. – Рыбинск, 1998 – 110 с. Деп. В ВИНИТ 16.10.98, N 3018-В98.23.
48. Колев, К.С. Точность обработки и режимы резания / К.С.Колев, Горчаков Л. М. – М.: Машиностроение, 1976. – 144 с.
49. Конева, Н.А. Физика прочности металлов и сплавов/ А.Н. Конева // Соросовский Образовательный Журнал, 1997. –№ 7 – С. 95 – 102.
50. Косилова, А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. Том 1/М.: Машиностроение, – 1986. – 656 с.
51. Косилова, А.Г., Мещеряков Р.К. Справочник технолога-машиностроителя. Том 2/ М.:Машиностроение, – 1985. – 496 с
52. Кудинов, В.А. Процесс резания как динамическая система / В.А. Кудинов // Конструкторско-технологическая информатика 2000: труды IV Международного конгресса. – М.: КТИ, 2000. – Т. 1. – С. 311–312
53. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
54. Курушин, А.А. Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL– М., «One-Book», 2016. – 376 с.

55. Кушнер, В. С. Материаловедение и технология конструкционных материалов / В.С. Кушнер, А.С. Верещака, А.Г. Схиртладзе, В.А. Горелов, Д.А. Негров, О.Ю. Бургонова– Омск : Издательство ОмГТУ, 2009. – 520 с.

56. Ларионов, М.А. Повышение точности консольного растачивания глубоких отверстий на основе моделирования процесса их обработки: дис. кандидата техн. наук – М., 2012. – С. 40-75.

57. Леонидов, П.В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхности силовых гидроцилиндров судового оборудования на основе виброустойчивой инструментальной системы: Дисс. ... канд. техн. наук. – СПб.: СПГУ, 2016. – 175 с.

58. Луцив, И.В. Обработка отверстий большого диаметра инструментами с адаптивной кинематической связью / И.В. Луцив, С.Г. Нагорняк // Технология и организация производства. – Киев, 1987. – С. 25–29.

59. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.

60. Максаров, В.В. Анализ реологических уравнений для моделирования процесса резания / В.В. Максаров, Е.Б. Козлова. // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. – СПб.: СЗПИ, 1999. – №13 – С.47 – 51.

61. Максаров, В.В. Кинематика процесса точения с локальным физическим воздействием на обрабатываемый материал / В.В. Максаров, Д.Ю. Тимофеев // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз.сб. СПб.: СЗПИ, 1998. – №3 – С.34 – 40.

62. Максаров, В.В. Моделирование динамических процессов механической обработки в среде NI LabVIEW для совершенствования технологии изготовления горных машин [Текст] / В.В. Максаров, Е. Ефимов, Д.А. Осминко // Металлообработка. – 2018.– №1(20). – С. 278–281.

63. Максаров, В.В. Повышение точности изготовления прецизионных поверхностей силовых гидроцилиндров механизированных

крепей на основе виброустойчивой инструментальной системы [Текст] / В.В. Максаров, П.В. Леонидов, Д.А. Осминко // *Металлообработка*. – 2016. – №2(92). – С. 41–53.

64. Максаров, В.В. Теория и методы моделирования и управления процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке: Дисс. ... док. техн. наук – СПб.: ГТУ, 1999. – 340 с.

65. Максаров, В.В. Теория и практика моделирования и управления в области прогнозирования динамических свойств технологических систем / В.В. Максаров, Ю. Ольт. // *Металлообработка*. – 2012. – № 2. – С.7 – 13.

66. Мурашкин, С.Л. Технология машиностроения: В 2 кн. Кн. 1. Основы технологии машиностроения/М.: Высш. Шк., 2003. – 278 с.

67. Мурашкин, С.Л. Технология машиностроения: В 2 кн. Кн. 2. Производство деталей машин / М.: Высш. Шк., 2003. – 295 с.

68. Мурашкин, Л.С. Исследования динамики процесса резания / Л.С. Мурашкин. – Дис. док. техн. наук – Л.: ЛПИ, 1958. – 348 с.

69. Мурашкин, Л.С. Прикладная нелинейная механика станков / Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин. – Л.: Машиностроение, 1977. – 192 с.

70. Мурашкин, С.Л. Колебания и устойчивость движения систем станков с нелинейными характеристиками процесса: Дисс. ... канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1980. – 548 с.

71. Мурашкин, С.Л. Технология машиностроения, Колебания и точность при обработке материалов резанием: Учеб. пособие / С.Л. Мурашкин, А.Г. Схиртладзе, А.М. Соловейчик, Э.Л. Жуков, И.И. Козарь, Б.Я. Розовский, В.В. Дегтярев. Под редакцией С.А. Мурашкина СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003, – 280 с.

72. Новиков, И.И. Дефекты кристаллического строения металлов / И.И. Новиков.– М.: Metallurgy, 1975. 208 с.

73. Орликов, М.Л. Динамика станков / М.Л. Орликов– 2-е изд., перераб, и доп. – К.: Высшая школа. Головное изд-во, 1989. – 272 с.

74. Осминко, Д.А. Анализ методов получения внутренних прецизионных поверхностей гидроцилиндров механизированных крепей [Текст] / В.В. Максаров, Ю. Ольт, Д.А. Осминко // Сборник трудов IV Международная научно-практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении» – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. – С.41–49.

75. Осминко, Д.А. Повышение качества изготовления деталей из титановых сплавов с применением инструмента, обладающего анизотропными свойствами [Текст] / Д.А. Осминко, А.Ю. Важенин // Сборник трудов Международной научно-технической конференции «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2017 – СПб.: «Горный университет», 2017. – С.296–298

76. Осминко, Д.А. Обеспечение надёжности и безопасности при управлении взрывоопасными средами в атомной и тепловой энергетике [Текст] / В.В. Максаров, Д.А. Осминко // Глобальная энергетика: партнерство и устойчивое развитие стран и технологий: сборник научно-практической конференции в рамках Форума проектов про-грамм Союзного государства – VI Форума вузов инженерно-технологического профиля, 24–28 октября 2017 г. – Минск.: БНТУ, 2018. – С.152-156. – С. 170–171.

77. Осминко, Д.А. Совершенствование технологии изготовления прецизионных поверхностей силовых гидроцилиндров на основе виброустойчивой инструментальной системы [Текст] / В.В. Максаров, П.В. Леонидов, Д.А. Осминко // Труды Международной научно-технической конференции «МТЕТ-2016» 6-7 октября 2016 – СПб.: Санкт-Петербургский Политехнический университет Петра Великого, 2016. – С.264–268.

78. Патент № 147413 СССР, МКП В23В 29/03, В23Q 11/06. Динамический виброгаситель для расточных оправок/ Д.И. Рыжков, заявитель и патентообладатель Рыжков. Д.И. –№ 680208; заявл. 26.09.1960; опубл. 01.01.1962. Бюл. №4

79. Патент № 95192 СССР, МКП F16F 13/00. Виброгаситель ударного действия/ Д.И. Рыжков, заявитель и патентообладатель Рыжков. Д.И. – № 445398; заявл. 14.05.1952; опубл. 01.01.1953. Бюл. №4

80. Патент №191536 Российская Федерация, МКП B23B 29/00. Оправка для растачивания ступенчатых глубоких отверстий в труднообрабатываемых деталях, сваренных из разнородных материалов / В.В. Максаров, Д.А. Осминко, Т.С. Голиков, заявитель и патентообладатель Санкт-Петербургский горный университет. – №2019105394; заявл. 26.02.2019; опубл. 12.08.2019. Бюл. №4

81. Петрешин, Д.И. Технологическое обеспечение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей машин на основе адаптивного управления: Дисс. ... канд. техн. наук – Брянск.: БГТУ, 2001. – 167 с.

82. Писаренко, Г.С. Вибропоглощающие свойства конструкционных материалов. Киев: Наукова думка, 1971. – 375 с.

83. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

84. Подураев, В.Н. Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1970. – 351 с.

85. Подураев, В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов / В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.

86. Полетика, М.Ф. Приборы для измерения сил резания и крутящих моментов / М.Ф. Полетика. – М.: Машгиз, 1969. – 194 с.

87. Половченков, А.Р. Колебания в металлорежущих станках / А.Р. Половченков – М.: Машгиз, 1961. – 108 с.

88. Попов, В.И. Динамика станков / Попов В.И., Локтев В.И. – Киев: Техника, 1975. – 134 с

89. Пуховский, Е.С. Безвибрационное многолезвийное резание / Е.С. Пуховский, Г. Э. Таурит, М.И. Лещенко. – К.: Техника, 1982. – 117 с.

90. Райцес, В.Б. Термическая обработка: в помощь рабочему-термисту/ М.: Машиностроение, 1980. –192 с
91. Рогов, В.А. Исследование демпфирующего свойства сборного токарного резца с применением композиционного материала в его конструкции/ В.А Рогов, С. Горбани // Фундаментальные исследования. – 2013. - №4-5 – 1094–1099 с.
92. Серебrenицкий, П.П. Технология сверления глубоких отверстий/ П.П. Серебrenицкий – СПб.: Лань, 2013. - 496 с.
93. Скуратов, Д.Л. Технология моделирования, проектирования техпроцессов и изготовления деталей типа тел вращения на малоразмерных токарных станках с ЧПУ: учеб. Пособие / Д.Л. Скуратов, А.И. Рязанов, И.А. Чигринев. – Самара: Изд-во Самар. Гос. Аэрокосм. Ун-та, 2013 – 104 с.
94. Соколовский, А.П. Точность механической обработки и пути ее повышения / М. - Л.: Машгиз, 1951. – 560 с.
95. Солод, Г.И., Технология машиностроения и ремонт горных машин/ Г.И. Солод, В.И. Морозов, В.И. Русихин. - М.: Недра, – 1988. – 421 с.
96. Старков, В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. / М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
97. Суслов, А.Г. Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки для повышения качества поверхностного слоя. Инженерный журнал № 10, 2001 – С. 22–24.
98. Суслов, А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей – М.: Машиностроение, 1987 – 208 с.
99. Схиртладзе А.Г. Гидравлические и пневматические системы: Учеб. Для сред. Проф.учеб. заведений / М.: Высш. шк., 2006.-534 с.
100. Ташлицкий, Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов [Текст] / Н.И. Ташлицкий // Вестник машиностроения. – 1960. – № 2. – С. 45–50

101. Тлустый, Дж. Сравнительное использование ударного и гармонического возбуждения при исследовании конструкций металлорежущих станков / Дж. Тлустый, К.С. Лоу, К. Партибаи // Труды Американского общества инженеров-механиков. Конструирование и технология машиностроения. Пер. с англ. – М.: Мир – 1974. – №1 – С. 89 – 99.
102. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый // Пер. с чеш. – М.: Машгиз, 1956. – 395 с.
103. Трент, Е.М. Резание металлов / Е.М. Трент. Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1980. – 263 с.
104. Уткин, Н.Ф. Обработка глубоких отверстий/ Н.Ф. Уткин, Ю.И. Кижняев и др. - Ленинград: Ленингр. отд-ние, 1988. – 269 с.
105. Фетисов, Г.П. Материаловедение и технология металлов: Учебник для студентов машиностроительных специальностей вузов / Г.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В. С. Гаврилюк и др.; Под ред. Г.П. Фетисова. – М.: Высшая школа, 2001. – 638 с.
106. Фридман, Л.Б. Механические свойства металлов / Л.Б. Фридман. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
107. Хаэт Г. Л. Сборный твёрдосплавный инструмент / Г.Л. Хаэт [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 256 с.
108. Хорошайло, В.В. Повышение виброустойчивости растачивания на токарно-винторезных станках. – 2016.-№1/1(27) –17–21 с.
109. Цеханов Ю.А. Моделирование деформационного упрочнения при накатывании сферической заготовки методом конечных элементов / Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин, Д.В. Карих, Д.А. Сергач /ВГАСУ
110. Чечурин, С.Л. Параметрические колебания и устойчивость периодического движения / С.Л. Чечурин. – Л.: Изд. ЛГУ, 1983. – 134 с.
111. Шведов, Н.Г. Автоматизация и управление процессом многолезвийной механической обработки на основе динамического моделирования технологической системы: Дисс. ... канд. техн. наук – СПб.: СЗТУ, 2008. – 154 с.

112. Штремель, М.А. Прочность сплавов: Дефекты решетки / М.А. Штремель.– М.: Металлургия, 1982. – 287 с.

113. Эльясберг, М.Е. Автоколебания металлорежущих станков / М.Е. Эльясберг. // Теория и практика. – СПб.: Изд. ОКБС, 1993. – 180 с.

114. Эльясберг, М.Е. Методические указания по расчёту устойчивости процесса резания металла на станках. Табличные расчёты систем с одним резцом и двумя степенями свободы в режимах устойчивого предельного цикла и равновесного состояния (РМ 32-4) / М.Е. Эльясберг. // Министерство станкостроительной и инструментальной промышленности СССР. Особое конструкторское бюро станкостроения. –Л.: Изд. ОКБС, 1979. – 58 с.

115. Эльясберг, М.Е. Повышение устойчивости автоколебательной системы при воздействии периодического изменения скорости резания / М.Е. Эльясберг, М.Г. Биндер. // Станки и инструмент. – 1989. – №10. – С. 19 – 21; №11. – С. 6 – 8.

116. Эльясберг, М.Е. Упрощённая модель многоконтурной динамической системы для расчёта станка на устойчивость при резании / М.Е. Эльясберг, В.А. Демченко. // Станки и инструмент, 1987. – №8 – С. 4 – 7.

117. Ochoa O.O. Finite element of analysis of Composite Laminates M.L./ O.O. Ochoa, J.N. Reddy – Texas: Kluwer Academic Publishers, 1992. – vol.209.

118. Sandip K. Improvement of Ra Value of Boring Operation Using Passive Damper/ K. Sandip, P. Jaydeep, J. Sainand,- The International Journal Of Engineering And Science (IJES) ISSN(e): 2319-1813 Vol.2 No.7 (2013), pp. 103-108.

119. Tobias, S.A. Schwingungen an Werkzeugmaschinen / S.A. Tobias – München: Carl-Hanser-Verlag, 1961. – vol. 322.

120. Антивибрационный инструмент Silent Tools: Техническое руководство SANDVIK Coromand. – АВ Sandvik Coromant, 2012. – 100 с. – Режим доступа: <https://www.sandvik.coromant.com/>

121. Общий каталог инструмента Mitsubishi. – Printed in Germany on Man Lithoman, 2014. – 1352 с. – Режим доступа: <http://www.mitsubishicarbide.com/>

122. Официальный сайт компании Plansee Group. – Режим доступа: <https://www.plansee.com/>

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Технические характеристики приборов

Таблица ПА1 – Технические характеристики профилометра TR200 (КНР)

Измеряемые параметры шероховатости	<i>Ra, Rz, Ry, Rq, Rt, Rp, Rmax, Rv, R3z, Rs, Rsm, RSk, Rmr</i> , исходный профиль (P)
Построение профилей	шероховатости (R) кривой Rmr (коэффициент использования материала Mг)
Коэффициенты увеличения профиля	по вертикали: 200х - 20000х, по горизонтали: 20х, 50х, 200х
Система мер	метрическая, британская
Дискретность индикации	0.001 мкм
Тип дисплея	матричный ЖКИ 128х64 точки, светодиодной подсветкой
Размеры ЖКИ	экран 50 х 30 мм отображает положение измерительной иглы датчика и уровень заряда аккумуляторной батареи
Отображение результатов	непосредственное отображение параметров шероховатости и профилей поверхности; печать данных; регулировка яркости ЖКИ; автоотключение после 5 минут перерыва с сохранением результатов; программная калибровка
Производитель	Time Group, КНР

Таблица ПА2 – Технические характеристики вибродиагностической аппаратуры «Prüftechnik VIBXPERTECH» (Германия)

<p>Измерительные каналы</p>	<p>2 аналоговых канала (А и В), настраиваемые:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Напряжение (АС/DC, ±30 В max.) • Ток (АС/DC, ±30 мА max.) • ICP® сигнал (2 мА, 24 В max.) • LineDrive сигнал (10 В, 10 мА max.) <p>1 аналоговый канал: датчик температуры (NiCrNi)</p> <p>1 цифровой канал: 1+импульсный вход (скорость вращения, триггер, фазовая отметка). Импульсный и АС сигналы: 0В..26В или 26В .. 0В</p>
<p>Параметры – аналоговый измерительный канал (А и В)</p>	<p>Частотный диапазон 0,5 Гц до 40 кГц Динамический диапазон (измеренный/общий) 96 дБ/136 дБ Частота дискретизации < 131 кГц на канал</p>
<p>Выходы</p>	<p>На стробоскоп: TTL На наушники и для обработки сигнала</p>
<p>Память</p>	<p>RAM, внутренняя 64 МБ Флеш-карта (CompactFlash) 1 ГБ</p>
<p>Дисплей</p>	<p>LCD, с подсветкой, 480x320 пикселей (1/2 VGA)</p>
<p>Пределы измерений/точность</p>	<p>Скорость вращения 10...200000 об/мин / ±1%/ ±1 об/мин Температура: -50...+1000 °C (NiCrNi)/ ±1% / ±1°C Ускорение зависит от подсоединенного датчика</p>
<p>БПФ</p>	<p>Fmin 0,5 Гц ... 10 Гц, настраиваемая Fmax 200 Гц ... 51.2 кГц, настраиваемая Число линий 400 ... 102400 Окна Rectangular, Hanning, Flattop, Hamming, Blackman, Bartlett, Kaiser</p>
<p>Режимы работы</p>	<p>Многорежимный (без маршрута)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Значения величин: вибрация (ускорение, скорость, смещение), ток, напряжение (АС / DC), ударные импульсы (состояние подшипников), температура, скорость вращения • Сигналы: спектр (амплитуда, огибающая), временной сигнал, кепстр, фаза (cross-channel), орбиты, измерения при выбеге, определение собственных частот <p>Сбор данных (по маршруту)</p>

	<ul style="list-style-type: none"> • Навигация посредством «дерева», списка или графиков • Оптимизация процесса для быстрого сбора данных <p>Балансировка (дополнительно)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Динамическая балансировка в 1 или 2 плоскостях <p>Запись (дополнительно)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Запись общих значений и спектра • Триггер по времени/событию • История записей
Питание	Литий-ионный аккумулятор (7,2В/4,8Ач). Перезаряжаемый. Время зарядки < 5 часов
Температурный диапазон	Хранения -20 °С ... +60 °С Рабочий -10 °С ... +50 °С Зарядки 0 °С ... +50 °С
Класс защиты	IP65, пылезащищенный и водонепроницаемый
Взрывобезопасность	ExII 2 G Ex ib IIC T4
Размеры	250 x 220 x 37 мм (ДxШxВ)
Вес	2,3 кг

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Технические характеристики станков**

Таблица ПБ1 – Технические характеристики горизонтальном токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L700MA (Южная Корея)

Диаметр над станиной	1050 мм
Макс. диаметр обработки	920 мм
Макс. длина обработки	1650 мм
Диаметр патрона	610 мм
Диаметр прутка	165 мм
Частота вращения	1500 об/мин
Мощность привода	45/37
Кол-во инструментов	12
Конус шпинделя	A2-8
Привод шпинделя	ремень
Перемещение X/Z	500/1680 мм
Быстрота подачи X/Z	12/16 м/мин
Тип направляющих	скольжения
Частота вращения приводного блока	3000 об/мин
Вес	18000 кг
Производитель	HYUNDAI WIA

Таблица ПБ2 – Технические характеристики горизонтальном токарном обрабатывающем центре Hyundai WIA L300LC (Южная Корея)

Диаметр над станиной	750 мм
Макс. диаметр обработки	560 мм
Макс. длина обработки	1320 мм
Диаметр патрона	305 мм
Диаметр прутка	90 мм
Частота вращения	3000 об/мин
Мощность привода	26/22
Кол-во инструментов	12
Конус шпинделя	A2-8
Привод шпинделя	ремень
Перемещение X/Z	355/750 мм
Быстрота подачи X/Z	20/24 м/мин
Тип направляющих	скольжения
Частота вращения приводного блока	3000 об/мин
Размер инструмента	25/50
Вес	7600 кг
Производитель	HYUNDAI WIA

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Патент «Оправка для растачивания ступенчатых глубоких отверстий в труднообрабатываемых деталях, сваренных из разнородных материалов».

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 191536

**ОПРАВКА ДЛЯ РАСТАЧИВАНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ
ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В
ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЯХ, СВАРЕННЫХ
ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Осминко Дмитрий Александрович (RU), Голиков Тарас Сергеевич (RU)*

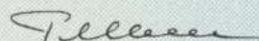
Заявка № **2019105394**

Приоритет полезной модели **26 февраля 2019 г.**

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре полезных
моделей Российской Федерации **12 августа 2019 г.**

Срок действия исключительного права
на полезную модель истекает **26 февраля 2029 г.**

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

 **Г.П. Ивлиев**



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(19) **RU** (11)**191 536**⁽¹³⁾ **U1**

(51) МПК
B23B 29/00 (2006.01)

(12) ОПИСАНИЕ ПОЛЕЗНОЙ МОДЕЛИ К ПАТЕНТУ

(52) СПК
B23B 29/00 (2019.05)

(21)(22) Заявка: 2019105394, 26.02.2019

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
26.02.2019

Дата регистрации:
12.08.2019

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 26.02.2019

(45) Опубликовано: 12.08.2019 Бюл. № 23

Адрес для переписки:
199106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет", отдел ИС и ТТ

(72) Автор(ы):
Максаров Вячеслав Викторович (RU),
Осминко Дмитрий Александрович (RU),
Голиков Тарас Сергеевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Санкт-Петербургский горный
университет" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: SU 1465178 A1, 15.03.1989. SU 994138
A2, 07.02.1983. SU 1787695 A1, 15.01.1993. RU
2067512 C1, 10.10.1996. RU 129439 U1, 27.06.2013.

(54) ОПРАВКА ДЛЯ РАСТАЧИВАНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЙ В ТРУДНООБРАБАТЫВАЕМЫХ ДЕТАЛЯХ, СВАРЕННЫХ ИЗ РАЗНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

(57) Реферат:

Полезная модель относится к области машиностроения, а именно к устройству по растачиванию глубоких ступенчатых отверстий в деталях, сваренных из разнородных материалов, при обработке которых не обеспечивается стабильность процесса резания.

Такие конструкции широко применяются в современной промышленности, в частности нефтегазовом секторе, например корпус двухходового электромагнитного запорного клапана выполнен из набора чередующихся между собой втулок из магнитных и немагнитных сталей, соединенных между собой сваркой, каждая из которых обладает разной обрабатываемостью при лезвийной обработке. В процессе растачивания отверстий переход лезвийного инструмента из одного материала в другой сопровождается возникновением вынужденных колебаний, связанных с низкой виброустойчивостью инструмента. На стыке

между двумя элементами сварной конструкции возникают задиры и глубокие риски, что недопустимо для изделий, осуществляющих регулирование движением газов, конденсатов, топлива и других продуктов нефтепереработки, поскольку к ним предъявляются высокие требования по безопасности и надежности. Задачей предъявленной полезной модели является расширение технологической возможности инструмента, которое позволит быстрее реагировать расточной оправке на различного рода вынужденным возмущениям, которые возникают при переходе из одного материала в другой, и гасить крутильные колебания в процессе обработки, повышая надежность работы расточной оправки при черновом и чистовом растачивании ступенчатых глубоких отверстий в труднообрабатываемых деталях и снижая амплитуды высокочастотных колебаний инструмента, что, как следствие, приведет к

RU 191536 U1

RU 191536 U1

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Акт о внедрении результатов работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ:



Директор по подготовке научных кадров и программ Горного университета

проф. И.Б. Сергеев

2019 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы в учебный процесс

Результаты диссертационной работы Осминко Д.А. «Совершенствование технологии изготовления внутренних цилиндрических поверхностей сварных деталей из разнородных сталей» внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

В частности, при обучении магистров по направлению 15.04.01 - «Машиностроение», по программе подготовки «Технология автоматизированного машиностроения» по дисциплине «Научные основы современного машиностроения» проводятся практические занятия по технологии растачивания отверстий диаметром от 48 до 500 мм и глубиной отверстия до 350 мм, в деталях типа «втулка», сваренных из разнородных сталей.

Технология растачивания отверстий в деталях, сваренных из разнородных материалов, с применением напряженно-деформированной расточной оправки (Патент №191536), расширяющей технологические возможности инструмента, за счёт обеспечения черного и чистового растачивания глубоких отверстий в сварных деталях приводит к повышению точности и качества внутренних прецизионных поверхностей.

На этапе полустачивки и чистовой обработки на станках токарной группы с режимными параметрами ($V_{рез}=160$ м/мин - скорость резания; $S_{рез} = 0,08$ мм/об - подача; $t_{рез} = 0,3$ мм - глубина резания) применялась расточная оправка, которая обладает свойством изменять собственное напряженно-деформированное состояние, посредством затягивания разжимного конуса, установленного во внутренней полости оправки. Такая конструкция расточной оправки позволяет незначительно снизить жёсткость и сближает частоты в контуре y и x . В итоге, можно считать, что касательный контур y вводится в область резонансных частот с нормальным контуром x , подавляя, таким образом, автоколебательный процесс при механической обработке.

Подавление колебательного процесса позволяет обеспечить заданные показатели точности формы и шероховатости элементов поверхности по значению Ra не более 1.6 мкм, применительно к изготавливаемой сварной детали. Значений шероховатости производится при помощи прибора SurfTest SJ-210, а показатели точности на станции модели MMQ 200 CNC. Данный технологический процесс позволяет повысить производительность обработки, решить проблему дискретизации технологического процесса сварных деталей, что является актуальной задачей современной промышленности.

Заведующий кафедрой «Машиностроения»
д.т.н., профессор

В.В.Максаров

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Акты о внедрении результатов работы в производство

Общество с ограниченной ответственностью

« НПО «Надежный»

Адрес: Российская Федерация, 197342, г. Санкт-Петербург, Красногвардейский пер., д.23А
Тел./факс: +7(800)555-55-72, e-mail: <http://npknaughty.ru/>
ОГРН 108784001550, ИНН 7804405507

АКТ КОМПЛЕКСНОГО ОПРОБОВАНИЯ

от 25.08.19 № 614/118

Санкт-Петербурге

Утверждаю:

Генеральный директор

Мартынов В.Н.



Акт

о промышленном апробировании
результатов кандидатской диссертационной работы
Осминко Дмитрия Александровича

Комиссия в составе:

Председатель:

Главный технолог

Члены комиссии:

Начальник ОПИ

Начальник цеха мех. обработки

Елизаров А.С.

Татаркина С.Ю.

Анцен С.Д.

Составила настоящий акт о проведении опытно-промышленного апробирования, в соответствии с представленными рекомендациями, технологического процесса растачивания отверстий в деталях, сваренных из разнородных сталей, с использованием напряженно-деформированной антивибрационной оправки, на участке механической обработки на токарных станках следующей моделей:

- 1) 16K20
- 2) HAAS TL-1

Анализ проведенных испытаний при получистовой и чистовой лезвийной обработке отверстий в труднообрабатываемых деталях, состоящих из комбинированных поверхностей, характеризующихся различной степенью обрабатываемости при механической обработке, с использованием усовершенствованной технологии показал:

- низкие показатели шероховатости не более 1,6 мкм по R_a , и обеспечение параметров точности по 7-8 качеству внутренних поверхностей сварной детали, с использованием предварительно напряженно-деформированной оправки;
- увеличение стабильности механической обработки по усовершенствованной технологии, посредством эффективного гашения вибраций на участке раздела двух материалов сварной конструкции в 1,25...1,3 раза, по сравнению с традиционной технологией;
- повышение износостойкости твердосплавных режущих пластин VBMT 110304- MM 2025 с углом заострения 35° в 1,5...1,8 раза на этапах получистового и чистового точения в сравнении с лезвийной обработкой исходным инструментом в условиях стандартной механической обработки резанием.

Результат анализа проведенных экспериментальных исследований по отработке технологии растачивания с применением предварительно напряженно-деформированной расточной оправки позволяет установить, что применение представленной усовершенствованной технологии обработки отверстий в деталях из разнородных металлов при тонкой лезвийной обработке обеспечивает получение требуемых показателей точности формы и шероховатости обработанных поверхностей сварных деталей, позволяет снижать время на операцию в технологическом процессе, благодаря непрерывному растачиванию всех участков заготовки, сваренной из разнородных сталей, что увеличивает производительность на 11%.

Комиссия в составе:

Председатель:

Главный технолог

Члены комиссии:

Начальник ОПИ

Начальник цеха мех. обработки

Елизаров А.С.

Татаркина С.Ю.

Анцен С.Д.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ
«ОРИОН»

ИНН: 7817317946, КПП: 781701001
196641, г. Санкт-Петербург, п. Металлострой,
Дорога на Металлострой, д.12, литер М
тел: (812) 60-777-10, факс: (812) 60-777-26
e-mail: ooo@npp-orion.ru

УТВЕРЖДАЮ:
Первый заместитель генерального директора
М.В. Котляревский



Акт о промышленном апробировании
Результатов кандидатской диссертационной работы
Осминко Дмитрий Александрович

Комиссия в составе:

Председатель: Заместитель генерального директора по производству Смирнов С.С.
Члены комиссии: Технический директор Корепин А.П.
Мастер участка Погорелый Ю.П.

Составили настоящий акт о том, что промышленные испытания предварительно напряженно-деформированной оправки для чистового растачивания ступенчатых отверстий в труднообрабатываемых деталях, сваренных из разнородных материалов, проведены в соответствии с представленными рекомендациями на токарном участке цеха механической обработки на токарных обрабатывающих центрах следующих моделей:

- 1) Hyundai WIA L300LC;
- 2) Hyundai WIA L700MA.

Сравнительные испытания при чистовой лезвийной обработке сварных заготовок из разнородных сталей показали:

- увеличение стабильности процесса растачивания отверстий на участке раздела двух материалов за счет эффективного гашения вибраций в 1,3...1,5 раза, при вылетах оправки от 4 до 8 диаметров отправки, по сравнению с лезвийной обработкой инструментом-аналогом (расточная оправка Silent Tools Coroturn SL);
- увеличение износостойкости лезвийного инструмента с использованием твердосплавных пластин VBMT 110304-MM 2025 с углом заострения 35° в 1,5...1,8 раза на этапах чистового точения, по сравнению с лезвийной обработкой таким же инструментом в условия стандартной механической обработки резанием;
- увеличение износостойкости лезвийного инструмента с использованием твердосплавных пластин VBMT 110302-PF 2025 с углом заострения 35° в 1,4...1,6 раза на этапах чистового и тонкого точения, по сравнению с лезвийной обработкой таким же инструментом в условия стандартной механической обработки резанием;
- снижение значений шероховатость, и повышение параметров точности внутренней поверхности сварной детали с использованием предварительно напряженно-деформированной оправки.

Результаты проведенных испытаний позволяют сделать вывод, что технология растачивания с применением предварительно напряженно-деформированной оправки обеспечивает заданные показатели шероховатости изделия и точности формы с сокращением машинного времени операции в технологическом процессе, что увеличивает производительность на 23% и так же увеличивает стойкость лезвийного инструмента.

Председатель:
Заместитель генерального директора по производству

Смирнов С.С.

Члены комиссии:
Технический директор

Корепин А.П.

Мастер участка

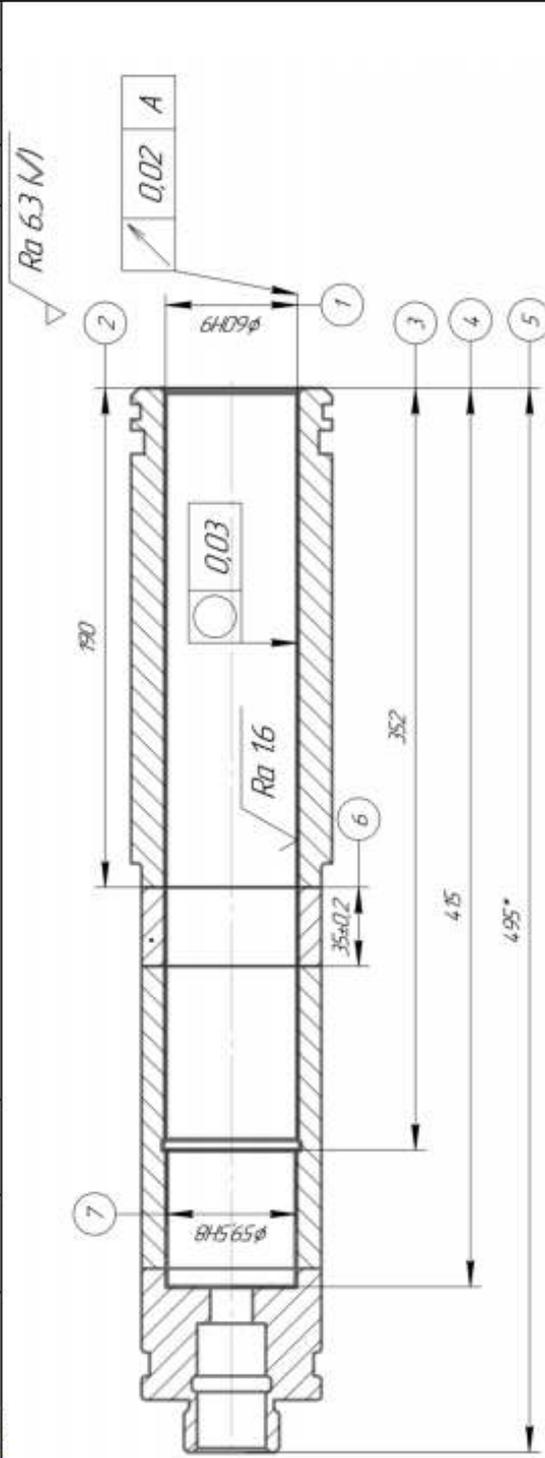
Погорелый Ю.П.

ГОСТ 3.1404-86

Форма 1

ГОСТ 3, 1105 – 84 Форма 7

Дубл.									
Взам.									
Подп.									
Изм.	Лист.	№ докум.	Подп.	Дата.					
			исъ.		3	3			
Разраб.	Павлов	ООО «НПП «ОРИОН»			К.60141.ХХХХ				
Провер.	Колмак	ДЕИА.301116.001.001							
Принял.									
Утверд.									
Н.контр.	Павлова	Труба			1	ТЧП	у	015	



1. *Размеры для справок
2. Общие допуски по ГОСТ 30893.1 -Н14, h14, ±^{IT14}/₂
3. Острые кромки притупить

КЗ