

На правах рукописи

ОСМИНКО Дмитрий Александрович



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

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,

Максаров Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты:

Васин Сергей Александрович

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тулский государственный университет», кафедра городского строительства, архитектуры и дизайна, профессор

Помпеев Кирилл Павлович

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», факультет «Систем управления и робототехники», доцент

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова»

Защита диссертации состоится 17 декабря 2020 г. в 12 ч. 30 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 16 октября 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время во многих отраслях промышленности нашли широкое применение детали, сваренные из разнородных сталей. Использование разнородных материалов позволяет снизить металлоёмкость, массу и наложить на конструкцию специальные физико-механические свойства, необходимые для решения технологических и конструкционных задач.

К технологическому процессу таких ответственных деталей, сваренных из разнородных материалов, предъявляются высокие требования с ограничением использования металлорежущего оборудования. В настоящих технологических процессах сталкиваются с серьёзными затруднениями изготовления подобных деталей. Это связано с потерей точности и шероховатости, вследствие растачивания разнородных материалов и низкой динамической устойчивости технологической системы при механической обработке глубоких отверстий.

В условиях конкурирующего рынка при производстве машин наибольшее распространение приобретают импортные технологии. Однако, устранение вибраций с их использованием при непрерывном процессе растачивания отверстий в деталях, сваренных из разнородных сталей, является трудоёмкой задачей. Следовательно, снижение колебаний в процессе растачивания отверстий в сваренной из разнородных элементов детали является актуальной задачей в современном машиностроении.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами обеспечения стабильности процесса обработки отверстий занимались такие ученые 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. В зарубежных странах для комплексного решения задач по обработке металла с середины 70-х создана специальная ассоциация «Boring and Trepanning Association» (BTA), которая занимается разработкой и совершенствованием технологии сверления глубоких отверстий. В эту ассоциацию входят такие компании как Sandvik Coromant, Iskar, SECO Tools AB и др.

В частности, компания Sandvik Coromant решает проблемы с вибрациями при больших вылетах инструмента путём использования 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 процесса обработки отверстий в сварных конструкциях. Переход к непрерывным автоматизированным технологическим процессам позволит увеличить масштабы производства и улучшить качество продукции.

Целью работы 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 при проведении механической обработки 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.

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 низкочастотный 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.

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

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**».

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 $t_{рез} = 0,35 \text{ мм}$), позволяет обеспечивать точность отверстий по IT 8-9 качеству со средним арифметическим отклонением профиля до 1 мкм при общем исходном припуске на обработку $\delta_{общ} = 0,7 \text{ мм}$.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Основные сведения диссертационного исследования предьявлялись на приведённых ниже научно-практических конференциях: Международном семинаре-симпозиуме «Нанозифика 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, г. Санкт-Петербург, 2019 г.).

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.

Личный вклад соискателя заключается в постановке цели; формулировании задач; разработке усовершенствованной технологии растачивания отверстий с использованием инновационной оправки, управляющей динамикой колебательного процесса обработки внутренних поверхностей деталей, сваренных из разнородных сталей, и в создании алгоритма, внедрённого в стойку станка с ЧПУ для стабильного осуществления технологического процесса обработки глухих и сквозных отверстий с точностью по IT 8-9 качеству со средним арифметическим отклонением профиля до 1 мкм

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, четырех 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели, задачи, научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведён анализ современного состояния вопроса растачивания отверстий в деталях, сваренных из разнородных сталей, к которым предъявляются высокие технологические требования по

качеству и точности поверхностей. Анализ показал, что к данному классу относится деталь «Труба» электромагнитного запорного клапана (рисунок 1), которая осуществляет регулирование потоков агрессивной среды. Исследуемая деталь состоит из разнородных материалов: 1, 3 – нержавеющая сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5949-2018; 2 – Сталь 45 (ГОСТ 1050-2013).

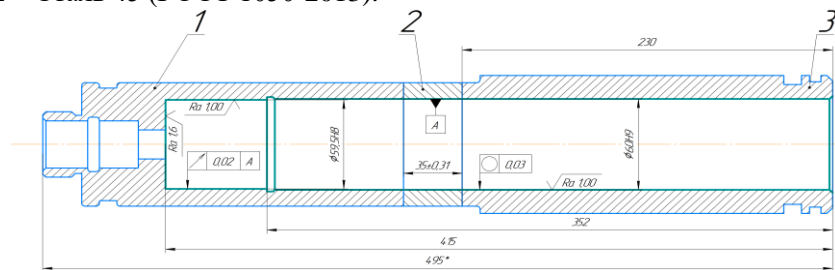


Рисунок 1 – Деталь «Труба» запорного электромагнитного клапана

Обработка разнородной конструкции сопровождается неустойчивым процессом растачивания. Объясняется это тем, что участок со сталью 12Х18Н10Т обладает более высокой пластичностью по сравнению со сталью 45. Данный процесс вызывает возрастание силы резания и трения, раскачивая замкнутую технологическую систему, что приводит к ухудшению шероховатости и точности формы. Обширный обзор данных показал, что базовая технология растачивания, даже с применением технологических решений по снижению уровня колебаний инструмента от Sandvik, Dorian, Seco, KENNAMETAL, не позволяет осуществить непрерывный технологический процесс растачивания отверстий с учётом предъявляемых требований точности и шероховатости. В соответствии с целью работы проведённый анализ позволил сформулировать задачи планируемых экспериментальных исследований.

Во второй главе разрабатывался способ технологического обеспечения заданной шероховатости и точности внутренней поверхности изделия из разнородных сталей посредством использования спроектированной antivибрационной расточной оправки в среде КОМПАС 3D Версии 18. Отличительной особенностью оснастки является разжимной конус 4, установленный во внутренней части оправки 5, который позволяет регулировать

напряженно-деформированное состояние по периферии (рисунок 2). Это позволит в широком диапазоне управлять динамическими параметрами разработанной расточной оправки.



Рисунок 2 – Конструкция antivибрационной расточной оправки, где: 1 – державка; 2 – резцовая головка; 3 и 6 – винты; 4 – разжимной стержень; 5 – корпус оправки; 7 – шайба; 8 – контргайка; 9 – гайка

Оценка эффективности разработанной расточной оправки осуществлялась через измерение динамических параметров. Жёсткость инструментов определялась экспериментально посредством ступенчатого нагружения через динамометр с шагом в 500 Н и возрастающим усилием до 2,5 кН. Разгрузку инструмента Sandvik и antivибрационной оправки производят аналогично с нагрузкой – ступенчато (рисунок 3).

Проведённая серия лабораторных сравнительных испытаний показала, что жёсткость antivибрационной оправки с предварительно напряжённо-деформированным состоянием при силе затяжки разжимного конуса $M_{кр} = 90 \text{ Н}\cdot\text{м}$ выше, чем у инструмента Sandvik.

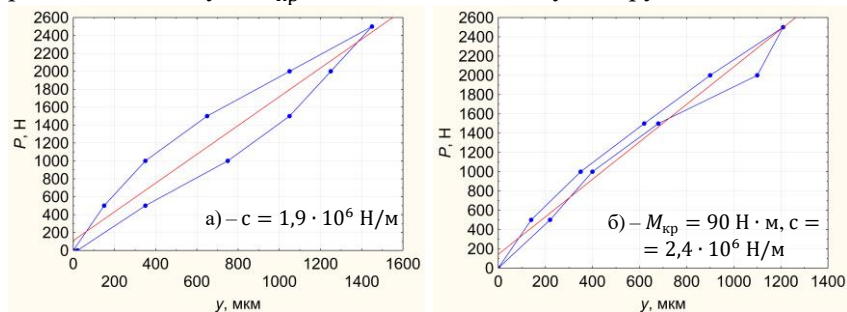
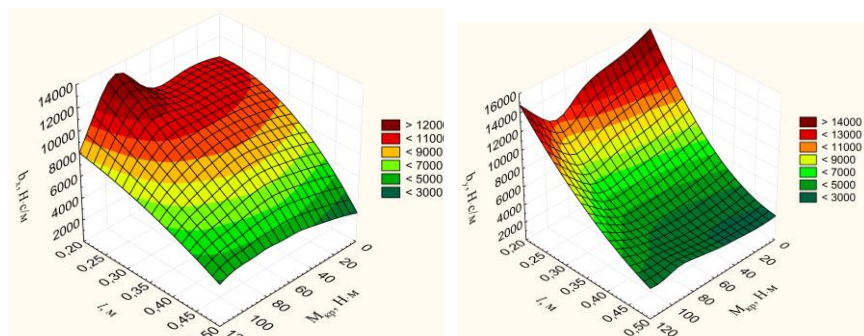


Рисунок 3 – Графики «нагрузка – перемещение» при испытании инструмента Sandvik а и разработанной antivибрационной расточной оправки б

Демпфирующие свойства определялись наиболее эффективным методом, основанным на нахождении собственных частот колебаний, рассчитанных параметров жёсткости и приведённой массы

(рисунок 4). Из приведённых графиков можно сделать вывод, что антивибрационная расточная оправка по сравнению с инструментом Sandvik обладает существенным преимуществом по демпфирующим свойствам. Разработанная в программной среде COMSOL Multiphysics трёхмерная цифровая модель антивибрационной расточной оправки с учётом полученных динамических параметров позволила оценить степень отжатия инструмента от обрабатываемого участка со сталью 12X18H10T и участка со сталью 45.



а) – Диссипативные силы по оси x

б) – Диссипативные силы по оси y

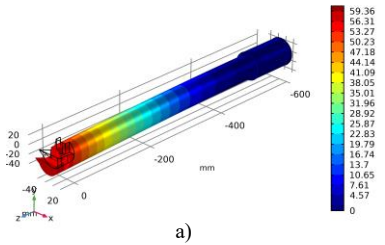
Рисунок 4 – Влияние степени затяжки антивибрационной расточной оправки и инструмента Sandvik при различных вылетах на демпфирующие свойства

На рисунке 5 а, б, в, г приведена динамическая характеристика инструментов при обработке участка из углеродистой стали (в направлении оси x – сила трения $Q_x = 41$ Н, а по направлению y – сила резания $P_y = 75$ Н).

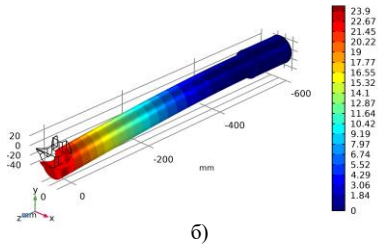
На рисунке 5 д, е, ж, з приведена динамическая характеристика инструментов при обработке участка из аустенитной стали (сила трения $Q_x = 65$ Н, сила резания $P_y = 109$ Н).

Как можно видеть, инструмент Sandvik испытывает большие отжатия чем разработанная расточная оправка при затяжке 90 Н·м разжимного конуса. 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 12X18H10T.

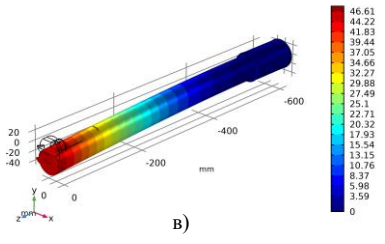
freq(412)=41.1 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp



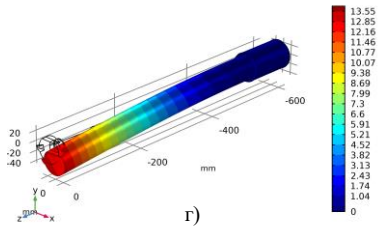
freq(722)=72.1 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp



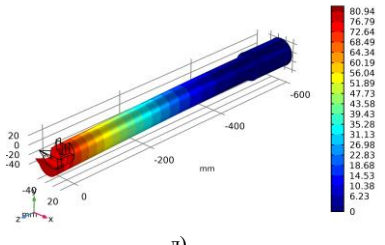
freq(375)=37.4 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp



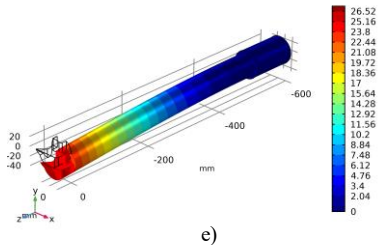
freq(686)=68.5 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp



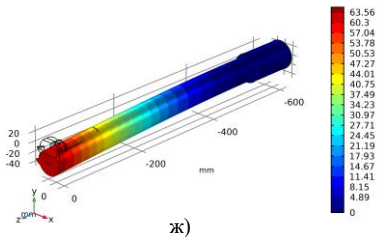
freq(412)=41.1 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp



freq(722)=72.1 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp



freq(375)=37.4 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp



freq(686)=68.5 Hz Contour: Total displacement (μm) Contour Deformation: Disp

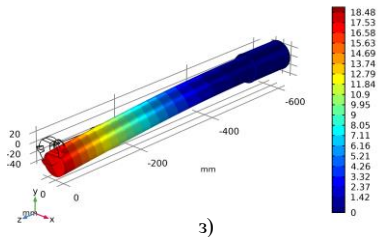


Рисунок 5 - Динамическая характеристика инструмента Sandvik *а, б и д* – при обработке по углеродистой и аустенитной стали соответственно, и antivибрационной расточной оправки *в, з и ж, з* – по углеродистой и аустенитной стали, соответственно, со степенью затяжки 90 Н · м при обработке аустенитной стали

В третьей главе показаны основные стадии разработки математической модели технологической системы при растачивании сваренной разнородной конструкции. При разработке имитационной модели, основной гипотезой возникновения автоколебательного процесса и его перехода в неустойчивое состояние будет считаться запаздывание силы резания P по отношению к силе трения Q . Математическая модель ТСМО состоит из двух систем уравнений, в которой одна система отвечает за обработку по углеродистой стали 45 (1), а вторая система дифференциальных уравнений относится к обработке по нержавеющей стали 12Х18Н10Т (2).

$$(1) \quad \begin{cases} X''_{90} \cdot \ddot{x} + X'_{90} \cdot \dot{x} + x = Q_{45} \\ Y''_{90} \cdot \ddot{y} + Y'_{90} \cdot \dot{y} + y = P_{45} \\ S_{45}^P P_{45} + P_{45} = -k_{45}x - S_{45}^{ky1} \dot{y} \\ S_{45}^Q Q_{45} + Q_{45} = P_{45} - S_{45}^{kx} x - S_{45}^{ky2} \dot{y} \end{cases} \quad (1)$$

$$(2) \quad \begin{cases} X''_{90} \cdot \ddot{x} + X'_{90} \cdot \dot{x} + x = Q_{12} \\ Y''_{90} \cdot \ddot{y} + Y'_{90} \cdot \dot{y} + y = P_{12} \\ Au_{12}^P P_{12} + P_{12} = -k_{12}x - Au_{12}^{ky1} \dot{y} \\ Au_{12}^Q Q_{12} + Q_{12} = P_{12} - Au_{12}^{kx} x - Au_{12}^{ky2} \dot{y} \end{cases} \quad (2)$$

где X''_{90} и Y''_{90} – постоянные времени; X'_{90} и Y'_{90} – постоянные времени демпфирования; S_{45}^P/Au_{12}^P и S_{45}^Q/Au_{12}^Q – составляющие сил трения и сил резания; k_{45} и k_{12} – коэффициент передачи; S_{45}^{kx}/Au_{12}^{kx} , $S_{45}^{ky1}/Au_{12}^{ky1}$ и $S_{45}^{ky2}/Au_{12}^{ky2}$ – постоянные времени демпфирования от изменения скорости резания; L_{45}^P/L_{45}^Q и L_{12}^P/L_{12}^Q – длины запаздывания сил резания; P_{45}/Q_{45} и P_{12}/Q_{12} – сил резания и трения.

Переключение между системами дифференциальных уравнений в математической модели осуществляется через тумблер (3):

$$C = \begin{cases} \text{– Если } T_I: t_0 \leq t_1: \\ S \left\{ P_{45}, Q_{45}, L_{45}^P, L_{45}^Q, S_{45}^P, S_{45}^Q, S_{45}^{ky1}, \right. \\ \left. S_{45}^{ky2}, S_{45}^{kyx}, k_{45}, \gamma_{45}^{90}, A_{45}^{90}, f_{45}, \varepsilon_{45} \right\}; \\ \text{– Если } T_{II}: t_1 < t_2: \\ N \{ P_x \rightarrow 0, Q_y \rightarrow 0 \}; \\ \text{– Если } T_{III}: t_2 < t_3: \\ Au \left\{ P_{12}, Q_{12}, L_{12}^P, L_{12}^Q, S_{12}^P, S_{12}^Q, S_{12}^{ky1}, \right. \\ \left. S_{12}^{ky2}, S_{12}^{kyx}, k_{12}, \gamma_{12}^{90}, A_{12}^{90}, f_{12}, \varepsilon_{12} \right\}; \end{cases} \quad (3)$$

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 12X18H10T; N – параметр, отражающий переходной процесс при растачивании разнородных участков; от t_0 до t_3 – время обработки, затрачиваемое на прохождение всех участков сварной детали.

Решение представленной системы дифференциальных уравнений (1) и (2) осуществляется через передаточные функции (3) в среде графического программирования LabVIEW 2019 (рисунок 6).

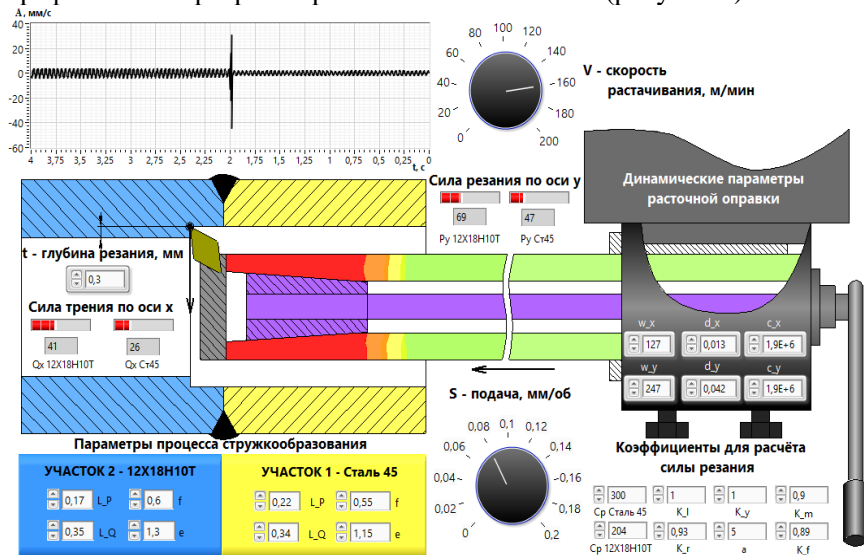


Рисунок 6 – Цифровой двойник по моделированию автоколебательного процесса при растачивании сварной разнородной конструкции

Посредством разработанного прибора анализировались существующие и подбирались новые режимы полустивого и чистового перехода. Как показало моделирование, эффект от степени напряжённо-деформированного состояния разработанной антивибрационной оправки обнаружен при моменте затяжки разжимного конуса от 60 до 90 Н·м. На границе раздела двух материалов амплитуда возмущений снизилась примерно на 40 % и на 69 % соответственно по сравнению с амплитудами колебаний, возникающих при работе инструмента Sandvik. Для дальнейших исследований выбирались такие режимы растачивания, при которых

амплитуда автоколебательного процесса не превышает допустимые значения.

В четвертой главе

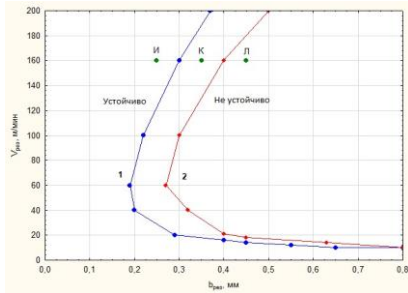
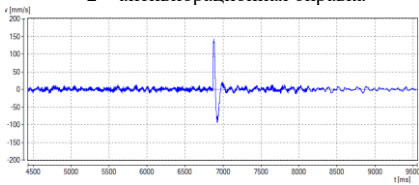
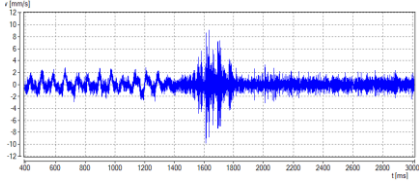


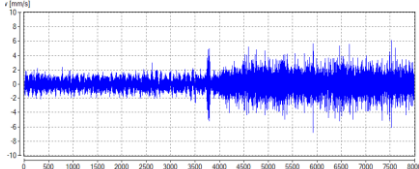
Рисунок 7 – Граница области устойчивости:
1 – инструмент Sandvik;
2 – antivибрационная опрaвка



а) – Устойчивый процесс растачивания для инструмента Sandvik в точке И (Рисунок 8)



б) – Устойчивый процесс растачивания для предлагаемой опрaвки в точке К (Рисунок 8)

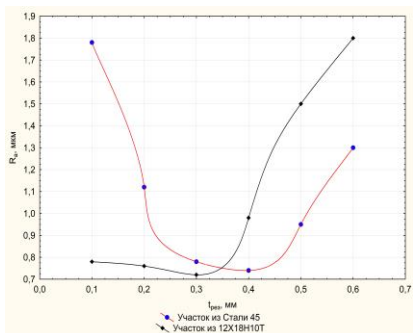


в) – Технологическая система станка неустойчивая в точке Л (Рисунок 8)

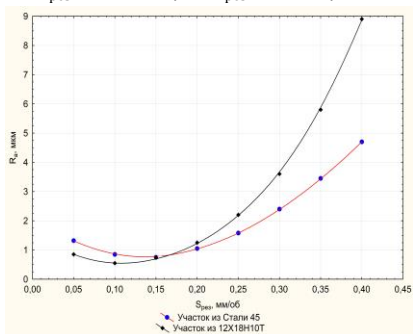
Рисунок 8 – Виброграммы в произвольных точках графика устойчивости (Рисунок 8)

проведены экспериментальные исследования на станке Hyundai WIA L300C по отработке технологии растачивания внутренних прецизионных поверхностей деталей, сваренных из разнородных сталей, с применением виброанализатора «Prüftechnik VIBXPERTEX». В ходе проведённых лабораторных исследований определены области устойчивости по двум технологическим параметрам b_c и $V_{рез}$ (рисунок 7). Граничные кривые, приведённые на диаграмме, характеризуют зоны устойчивости для инструмента Sandvik и для предлагаемой расточной отправки (рисунок 7). Справа от этих границ расположена область режимов обработки, на которых процесс растачивания является неустойчивым. На рисунке 8 приведены виброграммы в произвольных точках графика устойчивости (рисунок 7).

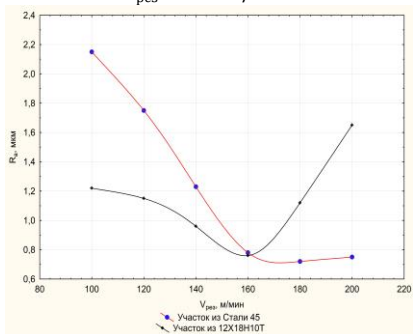
Следующий этап производственных испытаний посвящён определению влияния режимов механической обработки на шероховатость внутренней поверхности (рисунок 9) и точность формы (рисунок 10).



а) – от глубины растачивания:
 $S_{рез} = 0,08$ мм/об, $V_{рез} = 160$ м/мин

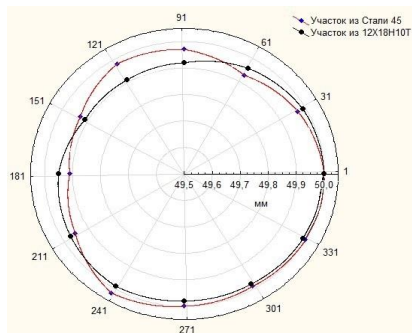


б) – от подачи: $t_{рез} = 0,35$ мм,
 $V_{рез} = 160$ м/мин

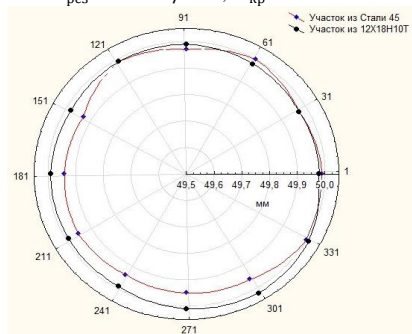


в) – от скорости растачивания:
 $t_{рез} = 0,35$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об

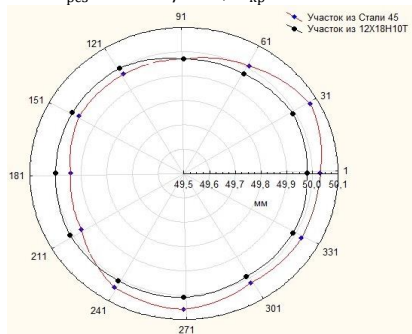
Рисунок 9 – Графики зависимости режимов резания от шероховатости поверхности



а) – $t_{рез} = 0,4$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об,
 $V_{рез} = 180$ м/мин, $M_{кр} = 90$ Н · м



б) – $t_{рез} = 0,35$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об,
 $V_{рез} = 160$ м/мин, $M_{кр} = 90$ Н · м



в) – $t_{рез} = 0,3$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об,
 $V_{рез} = 140$ м/мин, $M_{кр} = 90$ Н · м

Рисунок 10 – Сравнительный анализ круглограмм сварных образцов

Результаты серии экспериментальных исследований, с учётом проведённого моделирования в LabVIEW 2019 показали следующие результаты. На чистовом переходе механической обработки $t_{рез} = 0,35$ мм, $S_{рез} = 0,12$ мм/об, $V_{рез} = 160$ м/мин, при использовании антивибрационной расточной оправки со степенью затяжки $M_{кр} = 90$ Н·м, обеспечивается среднее арифметическое отклонение профиля до 1 мкм на всех участках исследуемой сварной детали. Помимо этого, разработанная расточная оправка позволяет достичь точности формы по качеству IT 8-9 и допуску круглости до 0,02 мм согласно технологическим требованиям детали «Труба».

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.

4. 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 .

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 на 69 % по сравнению с соответствующими вибрациями при реализации базового технологического процесса растачивания.

7. 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.

8. 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 обеспечения допустимой точности отверстия по IT 8-9 и допуску круглости до 0,02 мм.

9. Даны рекомендации и сформулированы перспективы развития усовершенствованной 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.

10. Разработанный и предложенный усовершенствованный технологический процесс изготовления детали «Труба», сваренной 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», и перспективных предприятий ООО «НПП «Орион» и ООО «НПО «Надёжный», подтверждающие положительный результат данной работы.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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.

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

Публикации в прочих изданиях:

3. **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.

4. **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.

5. **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.

6. **Осминко, Д.А.** Обеспечение надежности 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 программ Союзного государства – VI Форума вузов инженерно-технологического профиля, 24-28 октября 2017 г. – Минск.: БНТУ, 2018. – С.152-156.

Патент:

7. Патент №191536 Российская Федерация, МКП В23В 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.