

Тагильцев Святослав Васильевич

**СНИЖЕНИЕ ВИБРАЦИЙ ПРИ РАСТАЧИВАНИИ
ОТВЕРСТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВИБРОГАСЯЩИХ
УДЛИНИТЕЛЕЙ**

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук



Москва, 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана».

Научный руководитель:

Игнатов Алексей Владимирович, кандидат технических наук, доцент работает в МГТУ им. Н.Э. Баумана, на кафедре металлорежущих станков в должности доцента.

Официальные оппоненты:

Козочкин Михаил Павлович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Высокоэффективные технологии обработки» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»)), г. Москва.

Жмури Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования "Тульский Государственный Университет" (ФГБОУ ВО «ТулГУ»)), г. Тула.

Ведущая организация:

Воткинский филиал Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский Государственный Технический Университет имени М.Т. Калашникова» (ВФ ФГБОУ ВО «ИжГТУ им. М.Т. Калашникова»)), г. Воткинск.

Защита диссертации состоится «__» _____ 2024 г. на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок: 8 (499) 267-09-63.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря Диссертационного Совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Московского государственного технического университета имени Н. Э. Баумана, на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

к.т.н., доцент

Богданов А.В.

Актуальность работы

Современное машиностроение характеризуется: повышением точности деталей, снижением себестоимости и трудоемкости изготовления изделий, за счет повышения режимов резания. При этом увеличиваются мощности приводов, повышаются действующие нагрузки и скорости перемещения подвижных органов оборудования. Последствием этих процессов является значительный рост вибраций, которые существенно влияют на технологическую систему.

Все элементы технологической системы вносят свой вклад влияния вибрации на конечное качество изделия. Прямая зависимость от вибрации технологической системы особенно ярко проявляется на шероховатости поверхностного слоя. Теоретические и практические исследования показывают, что наиболее существенное влияние на шероховатость обработанных поверхностей оказывают именно колебания режущего инструмента, который в технологической системе является наиболее уязвимым элементом. Так, например, одной из трудоёмких операций при обработке деталей является растачивание отверстий, которое обладает рядом специфических особенностей, а применяемые расточные инструменты, в силу их недостаточной жёсткости и виброустойчивости, не обеспечивают требуемых параметров качества и производительности

Цель работы: повышение качества поверхностного слоя отверстий втулок, гильз, корпусов при эксплуатации металлорежущих станков расточной группы, укомплектованных виброгасящими удлинителями.

Объект исследования: виброгасящий удлинитель металлорежущего станка расточной группы.

Для достижения цели работы были поставлены и решены следующие **задачи:**

- Разработка и исследование процесса механической обработки отверстий на станках расточной группы с виброгасящими удлинителями
- Создание и расчет виброгасящего удлинителя для металлорежущих станков расточной группы, обеспечивающего повышение шероховатости обрабатываемых поверхностей деталей
- Разработка методики проектирования конструкции виброгасящего удлинителя для металлорежущих станков расточной группы.
- Исследование влияния режимов обработки на динамические характеристики виброгасящего удлинителя для металлорежущих станков расточной группы.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Выявлена закономерность влияния виброгашения на качество обработки заготовок расточными оправками с виброгасящими удлинителями. Применение виброгасящих удлинителей во время обработки заготовок из ст20, 30ХГСА и ВТ6 позволяет улучшить параметр шероховатости с Ra 3,2 до Ra 0,8.

- Исследовано поглощение вибрационной волны при обработке различных материалов расточной оправкой с виброгасящим удлинителем. Зафиксировано снижение вибраций в процессе растачивания при использовании виброгасящего удлинителя до 3 раз при обработке заготовок из ст20, до 4 раз при обработке заготовок из стали 30ХГСА, до 4 раз при обработке заготовок из сплава ВТ6

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Предложена методика проектирования конструкции виброгасящего удлинителя для металлорежущих станков расточной группы и рекомендации по выбору технологических режимов изготовления виброгасящего удлинителя.

2. Представлены рекомендации по применению виброгасящего удлинителя для металлорежущих станков расточной группы при обработке различных материалов. Данные рекомендации позволяют повысить параметр шероховатости Ra заготовок из материалов ст 20, 30ХГСА и ВТ6 в 4 раза по сравнению с цельным удлинителем. При обработке отверстий расточными оправками с виброгасящим удлинителем параметр шероховатости Ra составлял 0,8, тогда как параметр шероховатости Ra при обработке заготовки расточной оправкой с цельным удлинителем составлял Ra 3,2. В диссертационной работе получены значения шероховатости отверстий обработанных расточной оправкой с виброгасящим удлинителем близкие по своим показателям к шероховатости после окончательного шлифования. Данные преимущества позволяют значительно сократить себестоимость обработки изделий из ст 20, 30ХГСА и ВТ6 за счет сокращения отделочных методов обработки.

3. Выработаны рекомендации по внедрению в машиностроительное производство виброгасящего удлинителя расточной оправки. В данных рекомендациях определены граничные условия эффективного применения виброгасящего удлинителя расточной оправки, позволяющие повысить режимы резания при растачивании:

- при обработке заготовок из ст 20 допускается увеличить без потери качества глубину резания в 1,3 раза, и подачу в 1,3-1,4 раза
- при обработке заготовок из 30ХГСА допускается увеличить без потери качества глубину резания в 1,33-1,42 раза, и подачу в 1,2-1,35 раза
- при обработке заготовок из ВТ6 допускается увеличить без потери качества глубину резания в 1,64-1,67 раза, и подачу в 1,46 до 1,67 раза

Данные рекомендации позволяют значительно сократить трудоемкость обработки заготовок изделий из ст20, 30ХГСА и ВТ6 за счет интенсификации режимов резания.

Методы исследования

При выполнении работы использовались научные основы технологии машиностроения, теория резания, теория упругости материалов, методы математической статистики, метод конечных элементов. Аналитические зависимости получены при обработке экспериментальных данных с помощью

компьютерной программы Matlab. Разработка математических моделей производилась с использованием метода наименьших квадратов, метода сеточного поиска экстремума функции многих переменных, метода планирования эксперимента и других элементов высшей математики

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проектирования конструкции виброгасящего удлинителя для металлорежущих станков расточной группы и рекомендации по выбору технологических режимов изготовления виброгасящего удлинителя.
2. Рекомендации по применению расточных оправок с виброгасящими удлинителями при обработке различных материалов
3. Рекомендации по внедрению в машиностроительное производство виброгасящего удлинителя расточной оправки

Апробация работы

- Международная научно-техническая конференции «Страна живет, пока работают заводы». Юго-Западный гос. ун-т, Курск, 2015.
- II Международная научно-техническая конференция «Металлообрабатывающие комплексы и робототехнические системы – перспективные направления научно-исследовательской деятельности молодых ученых и специалистов». Курск. 2016.
- Девятая Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»: МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва – 2016
- IV Международная научная конференция «Морская техника и технологии. Безопасность морской индустрии». Калининград. 2016.
- V Международный балтийский морской форум – Калининград, 2017.

Публикации

По результатам исследования опубликовано 11 научных работах в отечественных и зарубежных журналах, 3 статьи в изданиях из перечня ВАК РФ, 5 статей в журналах, индексируемых в базе данных SCOPUS, 3 статьи в изданиях из перечня РИНЦ РФ

Во введении обоснована актуальность исследования решения задачи снижения вибрации при растачивании отверстий, рассмотрено влияние вибрации расточной оправки на качество поверхностного слоя детали.

В первой диссертационной главе проведен анализ литературных источников причин возникновения вибрации во время растачивания и выявлено, что наиболее существенное влияние на качество обработанных поверхностей оказывают именно вибрации расточной оправки, которая в технологической системе является наиболее слабым звеном. Так как расточная оправка являются наиболее слабым звеном технологической системы, то был сделан вывод, что наименее трудоёмким способом снижения вибрации технологической системы является изменение самой расточной оправки.

Рассмотрены конструкции современных изготовителей виброгасящих расточных оправок. Так, например, передовые зарубежные страны занимаются решением задачи снижения вибрации, путем изменения конструкции технологической оснастки расточной системы, что позволяет

снизить трудоемкость и себестоимость на чистовых и отделочных этапах обработки. Однако современные виброгасящие расточные системы имеют общие недостатки: высокая стоимость виброгасящих удлинителей, и ограниченность применения виброгасящих удлинителей за счет использования специальной оснастки для сборки, установки и наладки в оборудование.

Изучены научные работы в области растачивания и решения задачи снижения вибрации, разработанные на факультете «Машиностроительные Технологии» МГТУ им Баумана. На факультете были успешно защищены диссертационные работы Ушакова А.И., Соловьева А.И., Камсюка М.С., Симанчук Л. И., Гудкова В.В., Кетата В.В.

Эти исследования внесли свой вклад в развитие науки о резании металлов расточным инструментом и проблемы вибрации.

Проанализировано применение клеевых композиций в современном производстве металлорежущих инструментов. В ходе проведенного анализа было доказано широкое применение клеевых композиций в металлорежущих инструментах, что позволяет проводить дальнейшие исследования в разработке оригинального виброгасящего удлинителя. При этом среди всех используемых клеев в конструкциях инструмента 80% занимают клеевые композиции на эпоксидной основе, что предопределяет выбор клеевой композиции для оригинального виброгасящего удлинителя.

Во второй диссертационной главе, на основе проведенного анализа литературных источников в первой главе, был разработан классификатор расточных оправок с эффектом виброгашения, который учитывает не только конструктивные, но и технологические критерии при выборе расточных оправок. Технологическим критерием является выбор расточной оправки с различными методами виброгашения в зависимости от этапа технологического процесса обработки заготовки. (см. Рис.1)

Разрабатываемый классификатор расточных оправок с эффектом виброгашения выявляет различные конструктивные решения задачи вибрации при обработке отверстий расточными оправками. В классификаторе описаны преимущества и недостатки представленных направлений, классов и подклассов, анализируя предложенные параметры можно выбрать конструктивное решение, необходимый конструкционный материал и особенности внедрения в технологический процесс изготовления детали. Разработанный в данной диссертационной работе виброгасящий удлинитель расширяет классификатор на целый подкласс, что подтверждает оригинальность изобретения.

После проведения анализа литературных источников различных конструктивных виброгасящих решений была спроектирована оригинальная конструкция виброгасящей технологической оснастки, в виде удлинителя расточной оправки (см. Рис.2).

Виброгасящий удлинитель представляет собой конструкцию, состоящую из заднего фланца с конической поверхностью (Конус 50 АТ5 ГОСТ15945-82) для

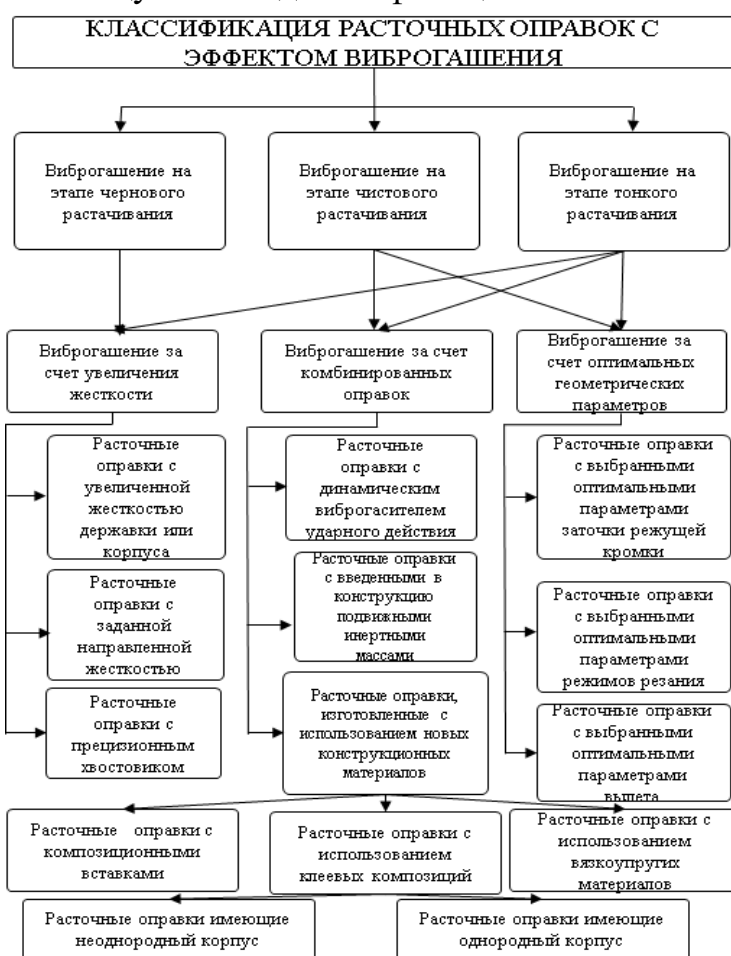


Рис. 1 Классификация расточных оправок с эффектом виброгашения

ГОСТ15945-82) для установки в шпиндель станка, удлинителя (поз. 2) и переднего фланца (поз. 3) с отверстием под крепление резцовой головки (поз.7). В полость удлинителя будет введена клеевая композиция на эпоксидиановой основе. Для обеспечения жесткости конструкции внутри удлинителя стягиваются металлические тросы (поз.5), с обоих концов металлические тросы установлены через штифт (поз. 6) во втулки (поз. 4), которые необходимы для регулировки натяга тросов. Оригинальным решением данной конструкции является использование клеевой композиции в качестве основного материала

поглощающего вибрационную волну. При этом клеевая композиция заливается внутрь полости удлинителя после натяжения тросов. Таким образом, клеевая композиция отверждается в расточной оправке, в которой умышленно создано напряженное состояние всей системы, с помощью натяжного механизма и возможностью регулировки натяжения тросов.

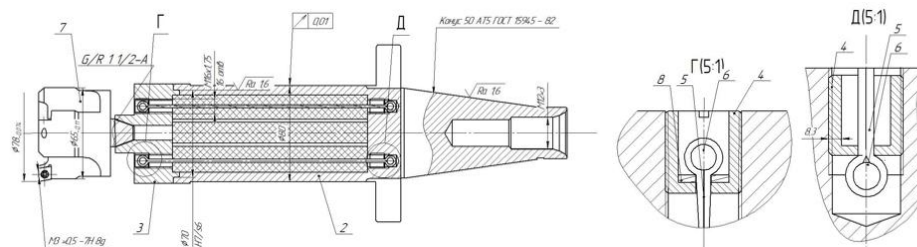


Рис. 2 Конструкция виброгасящего удлинителя расточной оправки

Согласно представленной конструкции виброгасящего удлинителя, был произведен расчет, позволяющий определить габариты виброгасящего удлинителя расточной оправки в зависимости от условий обработки.

Диаметр определяется из стандартного расчета:

$D_{удл} = D_{отв} - 2H$, где H вылет металлорежущей пластинки.

$$l = \sqrt{\frac{\left(\frac{390\pi D^2}{P_z}\right) - \frac{k_2 \delta^2}{D^2} - 1}{\left(\frac{k^2}{D^2} - \frac{2k}{D}\right)}}$$

Где: $k = 35,84$, $k_2 = 4 \times 16^2$, $D_{удл}$ - диаметр удлинителя, P_z -составляющая силы резания, δ - относительное удлинение при разрыве.

$$n_{тр} = \frac{4F_{пр} \left(\frac{M}{4l_{опр}} R_4 - \left(\sqrt{390^2 - 4 \left(\frac{M_k E_{тр}}{2W_{пр} E_{ст}} \right)^2 \frac{E_{ст}}{E_{тр}}} \right) \right) - P_x}{P_{сбi}}$$

Где: P_x составляющая силы резания, $F_{пр}$ – приведенная площадь поперечного сечения троса, R_4 -радиус поперечного круглого сечения троса, R_2 -радиус клеевой композиции, R_3 -радиус стального корпуса, $l_{опр}$ – длина оправки, $W_{пр}$ – приведенный момент сопротивления, M – суммарный изгибающий момент, $P_{сбi}$ – сила затяжки тросов, $E_{ст}$, $E_{кл}$, $E_{тр}$ – модуль упругости стального корпуса, клеевой композиции и металлических тросов.

Следующим этапом является выявление влияния параметров виброгасящего удлинителя на шероховатость. Для этого рассмотрим методику расчета шероховатости лезвийным инструментом. Исходная схема для расчета систематической составляющей высоты профиля шероховатости при механической обработке приведена на Рис.3.

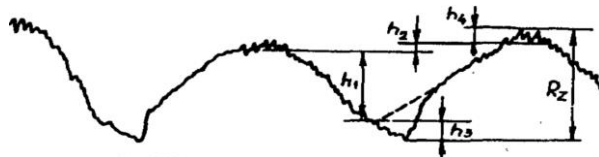


Рис. 3 Исходная схема для расчета высоты профиля шероховатости поверхности при механической обработке

На Рис.3 показано, что средняя высота профиля шероховатости в общем случае при всех методах механической обработки определяется равенством:

$$R_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4,$$

где h_1 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная геометрией рабочей части инструмента, h_2 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная колебаниями инструмента относительно обрабатываемой поверхности, h_3 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки, h_4 – составляющая профиля шероховатости, обусловленная шероховатостью рабочих поверхностей инструмента.

Формула для определения профиля шероховатости h_2 при лезвийной обработке расточной оправкой с виброгасящим удлинителем будет выглядеть следующим образом:

$$h_2 = \frac{c_y \cdot s^{y_{py}} \cdot v^{z_{py}} \cdot [HB_{\max}^n \cdot t^{x_{py}} - HB_{\min}^n \cdot (t - Rz_{исх})^{x_{py}}]}{(j_{ст.} + j_{ин.} + j_{заг.})^2} \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\left(1,875^2 \sqrt{\frac{EJ}{m_o l^4_{опр}}} \sqrt{1 - \frac{P_{сб}}{P_{сб \text{ крит}}}}\right)^2} + \frac{4\beta^2 \lambda^2}{\left(1,875^2 \sqrt{\frac{EJ}{m_o l^4_{опр}}} \sqrt{1 - \frac{P_{сб}}{P_{сб \text{ крит}}}}\right)^4}\right)}$$

Проведенный расчет габаритов виброгасящего удлинителя вместе с стандартными расчётами и зависимостями составляют этапы методики выбора виброгасящего удлинителя расточной оправки (см. Таблицу 1)

Таблица 1.

Основные этапы расчета и выбора виброгасящей расточной оправки

№	Наименование этапа	Действие	Результат
1	Определение этапа технологического процесса растачивания	В зависимости от чернового, полустогового или чистового этапа технологического процесса рекомендуются использовать определенные диапазоны режимов резания	Определен этап технологического процесса растачивания
2	Расчет и определение режимов резания	После определения диапазонов режимов резания происходит уточнение конкретных величин	Рассчитаны и определены режимы резания
3	Расчет габаритов виброгасящего удлинителя расточной оправки	В зависимости от внешних условий: силы резания, режимы резания, необходимая жесткость и материал виброгасящей расточной оправки рассчитываем габариты виброгасящей расточной оправки	Рассчитаны габариты виброгасящего удлинителя расточной оправки
4	Расчет параметра шероховатости	Рассчитывается по эмпирическим формулам параметр шероховатости $Rz = h_1 + h_2 + h_3 + h_4$,	Рассчитан параметр шероховатости
5	Конструирование и эксплуатация расточной оправки с виброгасящим удлинителем	Последовательно сконструирована расточная оправка, с виброгасящим удлинителем подготовлена техническая документация, подготовлен инструмент к эксплуатации	Сконструирована расточная оправка с виброгасящим удлинителем

В третьей диссертационной главе для решения поставленных в первой главе задач был спроектирован, изготовлен и собран виброгасящий удлинитель расточной оправки на основе теоретических зависимостей, описанных во второй главе.

Опытный образец виброгасящего удлинителя имеет следующие характеристики: количество тросов – 8шт с Ø2мм, крепления тросов осуществляется через резьбовые втулки, ввинченные в фланцы расточной оправки, габаритные размеры расточной оправки составляли $l=360\text{мм}$, $\varnothing=80\text{мм}$, материал сталь 30ХГСА, в качестве клеевой композиции использовался клей на эпоксидиановой основе ВК-9, клеевая композиция отверждалась при естественных условиях, при температуре 18—25°C в течение 48 часов окончательной выдержки. Для сравнения с виброгасящим удлинителем расточной оправкой был изготовлен цельный удлинитель расточной оправки с габаритами $l=360\text{мм}$, $\varnothing=80\text{мм}$, материал корпуса расточной оправки сталь 30ХГСА.

Для решения задачи разработка и исследование метода обработки заготовок расточными оправками с виброгасящими удлинителями были изготовлены стенды с закреплённой виброгасящей оправкой (Рис. 4, А) и свободно подвешенной (Рис. 4, Б). В экспериментальную установку входит: станок вертикально-фрезерный 6р12, виброанализатор VibPilot, магнитный датчик 352С03, рым-болт, тросов и ударный молоток с динамометрическим датчиком. Результаты эксперимента представлены в таблице 2.

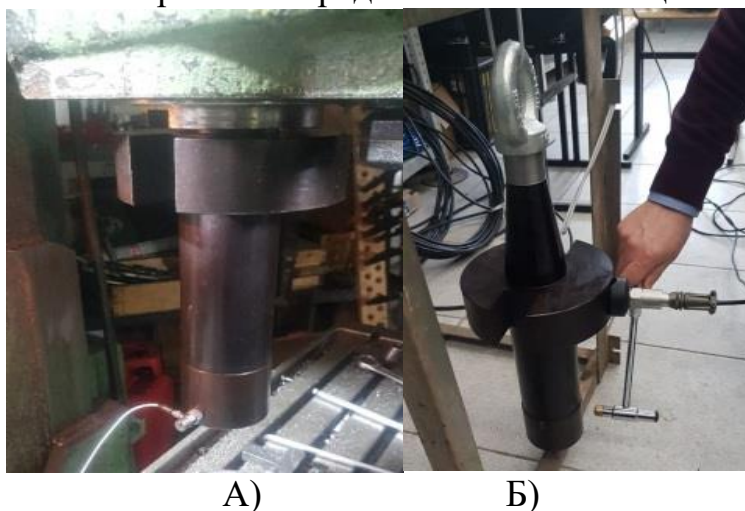
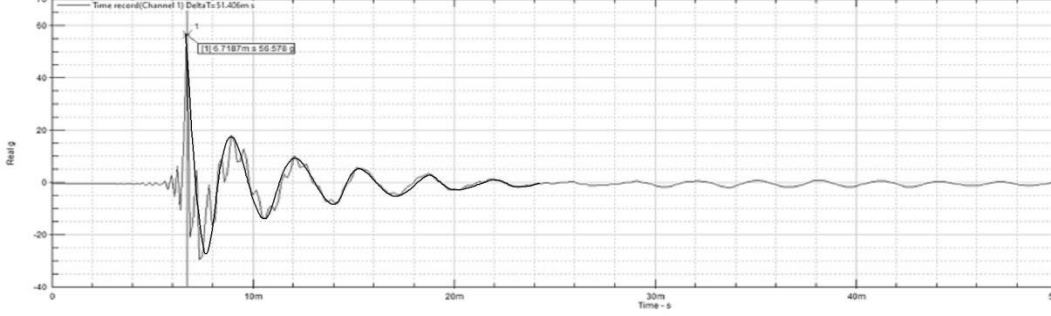
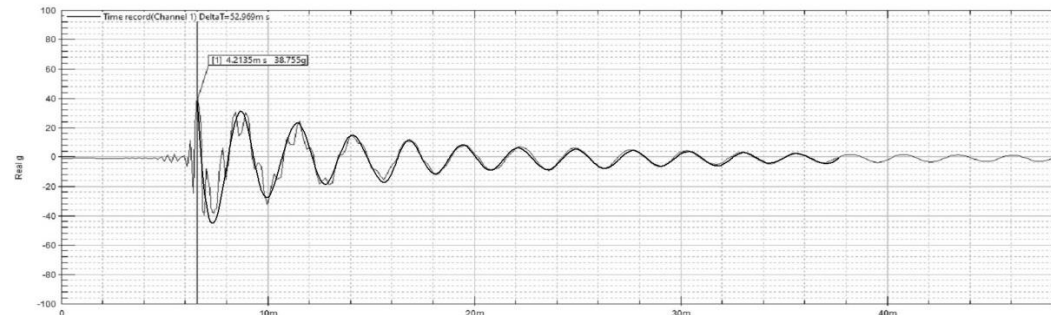
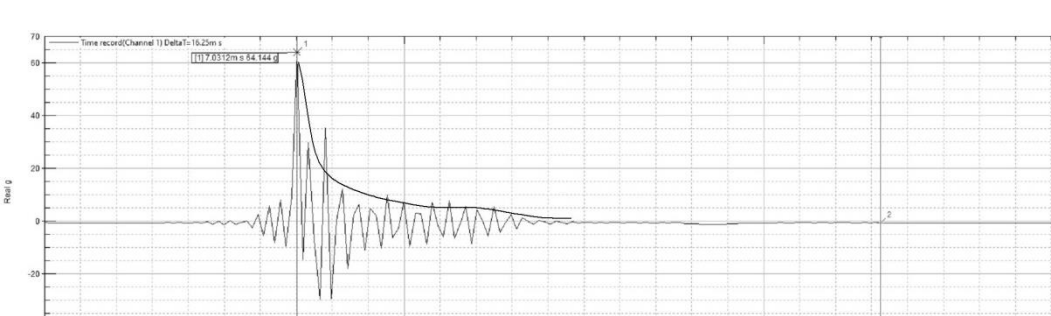
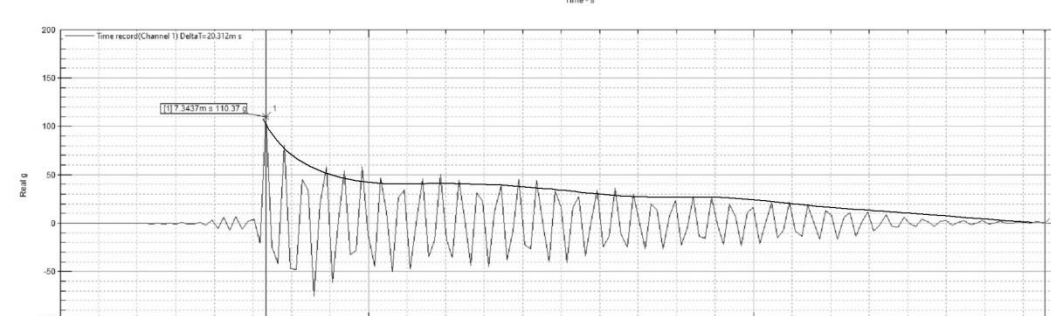


Рис.4 Опытные образцы виброгасящего удлинителя расточной оправки

В результате проведенного эксперимента зафиксировано увеличение коэффициента затухания β в 3 раза для виброгасящего удлинителя, по сравнению с цельным удлинителем в закрепленном шпинделе станка, также зафиксировано уменьшение коэффициента затухания β в 5 раз для виброгасящего удлинителя, по сравнению с цельным удлинителем в подвешенном состоянии. Время затухания виброгасящего удлинителя в закрепленном шпинделе и в подвешенном состоянии отличается менее чем на 7%, что позволяет утверждать о снижении влияния жесткости шпиндельной группы на конечный результат обработки.

Таблица 2

Результаты эксперимента

Исходные данные	График зависимости амплитуды колебаний удлинителя от времени
Виброгасящий удлинитель расточной оправки, в закрепленном	 <p data-bbox="448 651 1511 689">Коэффициент затухания $\beta = 360$</p>
Цельный удлинитель расточной оправки, в закрепленном шпинделе	 <p data-bbox="448 1021 1511 1077">Коэффициент затухания $\beta = 71$</p>
Виброгасящий удлинитель расточной оправки, в подвешенном состоянии	 <p data-bbox="448 1408 1511 1487">Коэффициент затухания $\beta = 940$</p>
Цельный удлинитель расточной оправки, в подвешенном состоянии	 <p data-bbox="448 1818 1511 1883">Коэффициент затухания $\beta = 320$</p>

Для решения задачи выявления влияния обработки расточными оправками с виброгасящими удлинителями на шероховатость обрабатываемых поверхностей заготовок был разработан испытательный стенд, на базе металлорежущего станка мод. 2421 (см. Таблицу 3).



Рис. 5

Испытательный
стенд

Испытательный стенд на базе координатно-расточного станка мод. 2421. В испытательный стенд входит: координатно-расточной станок мод. 2421, специальное приспособление для закрепления заготовок и виброметр ВШВ-003-М2. Базирование заготовки в приспособлении происходит по внешней цилиндрической поверхности и плоскости, что лишает заготовку 5 степеней свободы. Наименьшие вибрации в ходе эксперимента испытывала оправка с вибрационным удлинителем при обработке заготовок из материалов: сталь 20, сталь 30ХГСА и титанового сплава ВТ6. Максимальное снижение вибрации для заготовок из стали 20 составило 300%, для заготовок из 30ХГСА – 350%, для заготовок из ВТ6 – 400%.

Таблица 3

Результаты эксперимента

	п, об/мин	t, мм	S, мм/мин
ВТ6			
30ХГСА			
Ст20			
Д16			

В рамках проведённого эксперимента были получены следующие эмпирические закономерности технологического процесса обработки заготовок растачиванием:

- Амплитуды вынужденных колебаний заготовки(мкм) от частоты вращения (об/мин)- $V=f(n)$
 $V = (4.8285155 \cdot 10 \cdot n^2) / 10000000 - 0.0017234 \cdot n + 1.6030632$ – Ст20
 $V = -(2.9588789 \cdot n^2) / 1000000 + 0.0022734 \cdot n + 0.3275769$ – 30ХГСА
 $V = -(4.1902205 \cdot n^2) / 1000000 + 0.0019512 \cdot n + 0.9154167$ – ВТ6
 $V = (2.0187397 \cdot n^2) / 10000000 - (4.1157943 \cdot n) / 10000 + 0.8479489$ – Д16
- Амплитуды вынужденных колебаний заготовки(мкм) от глубины резания (мм)- $V=f(t)$
 $V = -0.0064286 \cdot t^2 + 0.0179286 \cdot t + 0.903$ – ВТ6
 $V = 0.0107143 \cdot t^2 + 0.0093571 \cdot t + 0.793$ – 30ХГСА
 $V = -0.005 \cdot t^2 + 0.0295 \cdot t + 1.429$ – Ст20
 $V = 0.025 \cdot t^2 - 0.0737857 \cdot t + 0.841$ – Д16
- Амплитуды вынужденных колебаний заготовки(мкм) от подачи (мм/мин) - $V=f(s)$
 $V = 0.0116667 \cdot s^2 - 0.1783333 \cdot s + 1.79$ – ВТ6
 $V = -0.0092857 \cdot s^2 + 0.2007143 \cdot s - 0.1214286$ – 30ХГСА
 $V = 0.0019048 \cdot s^2 + 0.0419048 \cdot s + 0.8128571$ – Ст20
 $V = -0.0013095 \cdot s^2 + 0.0436905 \cdot s + 0.5842857$ – Д16

Для решения задачи - выявление влияния обработки расточными оправками с виброгасящими удлинителями на шероховатость обрабатываемых поверхностей заготовок, был разработан испытательный стенд. В испытательный стенд входит: лабораторный стол, специальное приспособление для установки заготовок по наружной цилиндрической поверхности, профилометр Mitutoyo мод. SJ-410 с щуповым методом определения шероховатости (см. Рис. 6).

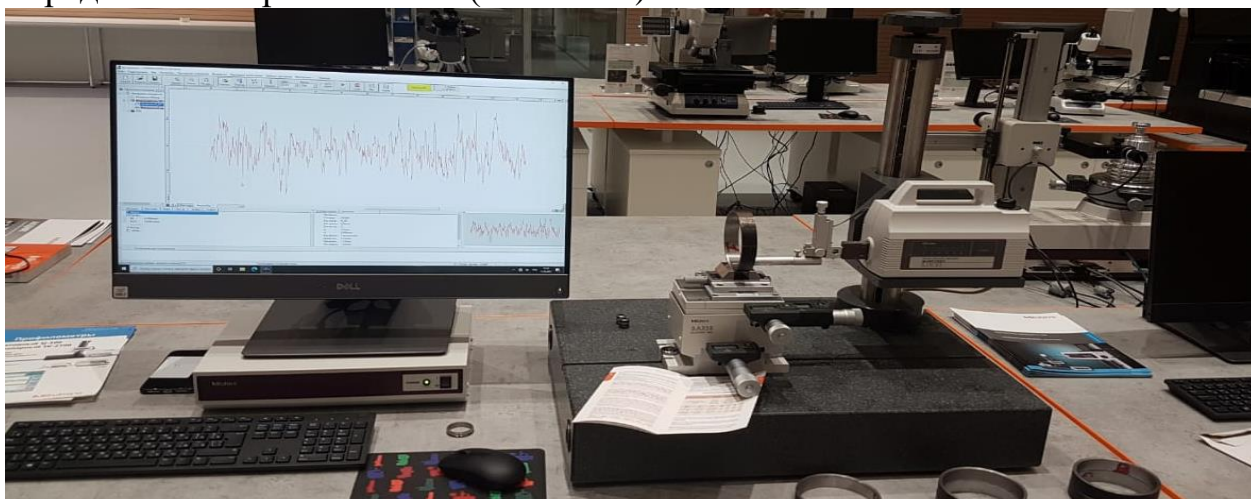
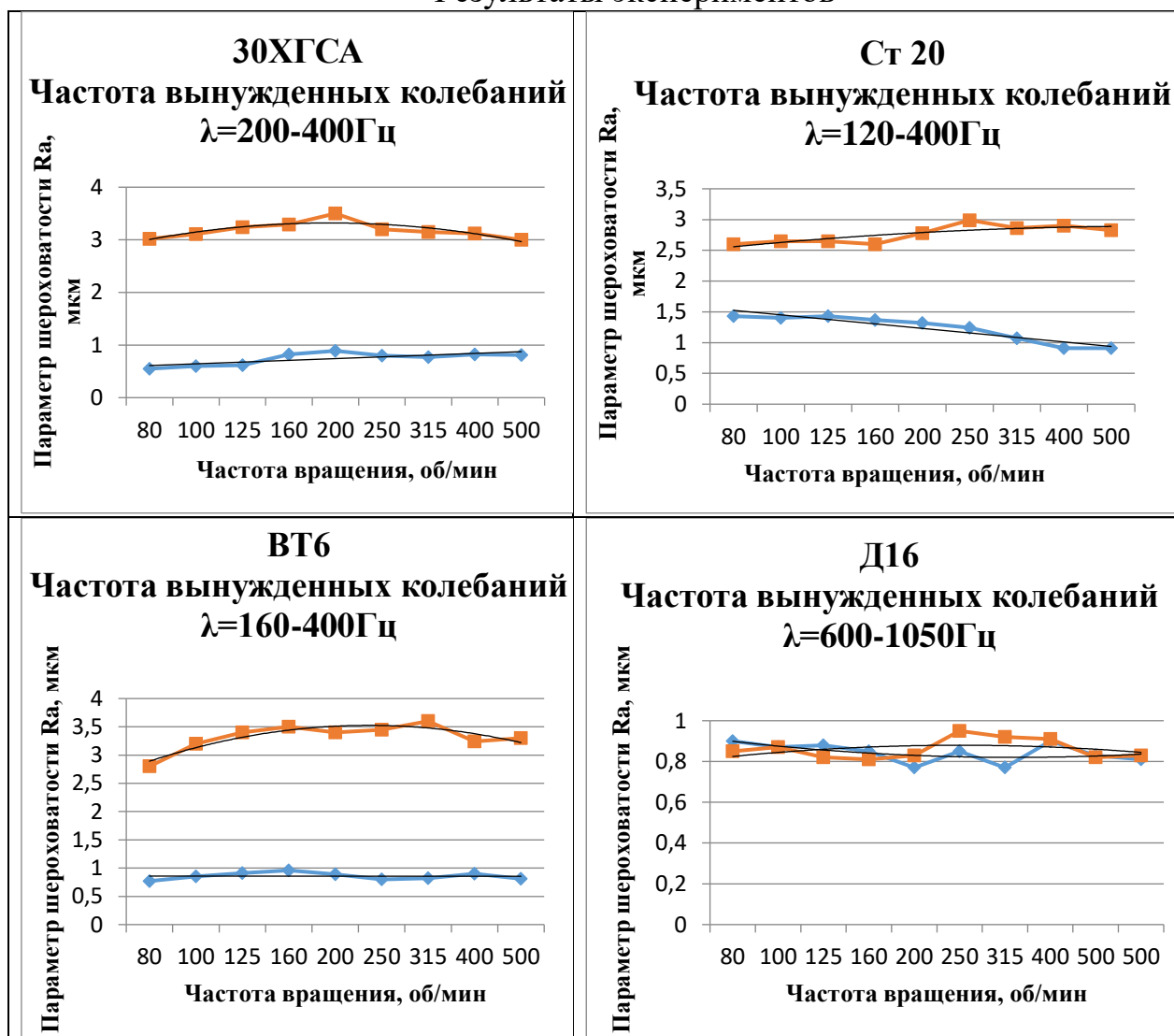


Рис.6 Испытательный стенд для контроля шероховатости

Результаты экспериментов



Результаты эксперимента показали, что параметр шероховатости R_a заготовок из материала ст 20, 30ХГСА и ВТ6 при обработке расточными оправками с виброгасящим удлинителем, составляет $R_a 0,8$. Параметр шероховатости R_a при обработке заготовок из материалов ст 20, 30ХГСА и ВТ6 расточной оправки с цельным удлинителем составляет $R_a 3,2$. Зафиксировано стабильное улучшение шероховатости поверхности заготовок в 4 раза.

В четвертой диссертационной главе был проведён анализ полученных данных экспериментов для выявления рекомендаций эффективного внедрения в производственный процесс.

Анализ показал, что использование расточных оправок с виброгасящими удлинителями при обработке заготовок из ст 20, 30ХГСА и ВТ6 позволит:

1. Снизить себестоимость изготовления деталей за счет исключения дорогостоящих финишных методов обработки. Применение виброгасящих удлинителей при обработке заготовок из ст 20, 30ХГСА и ВТ6 позволяет

получить параметр шероховатости Ra 0.8 близкий по значению к шероховатости после окончательного шлифования.

2. Снизить трудоемкость изготовления деталей за счет интенсификация режимов резания и сокращения дополнительных проходов расточным инструментом. При обработке заготовок из ст 20 допускается увеличить, без потери качества, глубину резания увеличить в 1,3 раза, подачу в пределах от 1,3-1,4. При обработке заготовок из 30ХГСА допускается увеличить, без потери качества, глубину резания увеличить в 1,33-1,42 раза, подачу в пределах от 1,2-1,35. При обработке заготовок из ВТ6 допускается увеличить, без потери качества, глубину резания увеличить в 1,64-1,67 раза, подачу в пределах от 1,46 до 1,67 раз.

При анализе литературных источников было выявлено, что современные антивибрационные расточные системы имеют общий недостаток – высокую стоимость. Именно поэтому был проведен расчет себестоимости изготовления виброгасящего удлинителя для сравнения с виброгасящими зарубежными удлинителями расточных оправок и определена стоимость виброгасящего удлинителя (см. Таблицу 5).

Таблица 5

Значения ценовых показателей виброгасящих удлинителей оправок с отношением длины к диаметру 3-4

№ п/п	Наименование расточной модульной оправки	Диаметр удлинителя расточной оправки, мм	Стоимость, руб
1	Kaiser EWN Smart Damper Fine Boring Head CKB6-EWN68DP-240	64	478764
2	NOVItech MVS-Verbindungsstelle	80	414315
3	Виброгасящий удлинитель	82	22100
4	Антивибрационный удлинитель расточной оправки RBH SLBK6-6-160L	64	373496

В ходе решения задачи, изучения граничных условий применения виброгасящих удлинителей расточных оправок было получено теоретическое и практическое обоснование возможности использования виброгасящего удлинителя расточной оправки. Однако для более полного изучения влияния обработки расточными оправками с виброгасящими удлинителями на качество деталей необходимо провести моделирование многофакторного эксперимента в программном модуле Matlab

Общие выводы и рекомендации

1. Разработан оригинальный классификатор расточных оправок с эффектом виброгашения, на основе анализа технологических критериев процесса резания.

2. Предложена виброгасящая технологическая оснастка, в виде оригинального удлинителя расточной оправки с использованием клеевой композиции, поглощающей вибрационную волну
3. Разработана оригинальная методика проектирования конструкции виброгасящего удлинителя расточной оправки, основанная на эмпирических и теоретических закономерностях и технологических параметрах процесса резания. Представленные теоретические зависимости позволяют определить габариты виброгасящего удлинителя в зависимости от сил резания
4. В результате эксперимента зафиксировано:
 - увеличение коэффициента затухания β в 5 раз для виброгасящего удлинителя, по сравнению с цельным удлинителем закрепленном в шпинделе станка
 - увеличение коэффициента затухания β в 3 раза для виброгасящего удлинителя, по сравнению с цельным удлинителем в подвешенном состоянии
 - Время затухания виброгасящего удлинителя в закрепленном шпинделе и в подвешенном состоянии отличается менее чем на 7%, что позволяет утверждать о снижении влияния жесткости шпиндельной группы на конечный результат обработки
5. В результате эксперимента установлено
 - Заготовки из ст 20 при обработке расточной оправкой с виброгасящим удлинителем испытывали амплитуду вынужденных колебаний от 1,0 до 1.4 мкм, с цельным удлинителем испытывали амплитуду от 2,5 до 3,0 мкм. Зафиксировано снижение вибраций в 2-3 раза при обработке заготовок из материалов ст20.
 - Заготовки из 30ХГСА при обработке расточной оправкой с виброгасящим удлинителем испытывали амплитуду вынужденных колебаний от 0,4 до 0.85 мкм, с цельным удлинителем испытывали амплитуду от 2,6 до 3,4 мкм. Зафиксировано снижение вибраций в 4 раза при обработке заготовок из материалов 30ХГСА.
 - Заготовки из ВТ6 при обработке расточной оправкой с виброгасящим удлинителем испытывали амплитуду вынужденных колебаний от 0,91 до 1,2 мкм, с цельным удлинителем испытывали амплитуду от 2,5 до 3,5 мкм. Зафиксировано снижение вибраций в 3-4 раза при обработке заготовок из материалов ВТ6.
6. В результате эксперимента определены:
 - Параметр шероховатости R_a заготовок из материала ст 20 при обработке расточными оправками с виброгасящим удлинителем, который составляет R_a 0,8. Параметр шероховатости R_a при обработке заготовки расточной оправкой с цельным удлинителем составляет R_a 3,2. Зафиксировано стабильное улучшение шероховатости поверхности заготовок в 4 раза
 - Параметр шероховатости R_a заготовок из материала сталь 30ХГСА при обработке расточными оправками с виброгасящим удлинителем, который составляет R_a 0,8. Параметр шероховатости R_a при обработке заготовки расточной оправкой с цельным удлинителем составляет R_a 3,2. Зафиксировано стабильное улучшение шероховатости поверхности заготовок в 4 раза

- Параметр шероховатости Ra заготовок из материала ВТ6 при обработке расточными оправками с виброгасящим удлинителем, который составляет Ra 0,8. Параметр шероховатости Ra при обработке заготовки расточной оправкой с цельным удлинителем составляет Ra 3,2. Зафиксировано стабильное улучшение шероховатости поверхности заготовок в 4 раза
7. Экспериментально доказано, что в расчетном диапазоне вынужденных частот от 100 до 600Гц, заготовки, обработанные расточной оправкой с виброгасящим удлинителем, имеют параметр шероховатости Ra в 2-4 выше, чем параметр шероховатой Ra заготовок, обработанных расточной оправкой с цельным удлинителем.
 8. Экспериментально доказано, что при вынужденных частотах выше 800Гц качество поверхностного слоя заготовок после обработки идентичное в обоих случаях. При обработке заготовок из материала Д16 была зафиксирована частота в диапазоне 800-1000Гц, и шероховатость заготовок, обработанных при данном частотном диапазоне, идентичная.
 9. Исследованы следующие эмпирические закономерности технологического процесса обработки заготовок растачиванием, отражающие зависимости:
 - Амплитуды вынужденных колебаний заготовки (мкм) от частоты вращения (об/мин)- $V=f(n)$
 $V = (4.8285155 \cdot 10^{-6} \cdot n^2) / 10000000 - 0.0017234 \cdot n + 1.6030632$ – Ст20
 $V = -(2.9588789 \cdot n^2) / 1000000 + 0.0022734 \cdot n + 0.3275769$ – 30ХГСА
 $V = -(4.1902205 \cdot n^2) / 1000000 + 0.0019512 \cdot n + 0.9154167$ – ВТ6
 $V = (2.0187397 \cdot n^2) / 10000000 - (4.1157943 \cdot n) / 10000 + 0.8479489$ – Д16
 - Амплитуды вынужденных колебаний заготовки (мкм) от глубины резания (мм)- $V=f(t)$
 $V = -0.0064286 \cdot t^2 + 0.0179286 \cdot t + 0.903$ – ВТ6
 $V = 0.0107143 \cdot t^2 + 0.0093571 \cdot t + 0.793$ – 30ХГСА
 $V = -0.005 \cdot t^2 + 0.0295 \cdot t + 1.429$ – Ст20
 $V = 0.025 \cdot t^2 - 0.0737857 \cdot t + 0.841$ – Д16
 - Амплитуды вынужденных колебаний заготовки (мкм) от подачи (мм/мин) - $V=f(s)$
 $V = 0.0116667 \cdot s^2 - 0.1783333 \cdot s + 1.79$ – ВТ6
 $V = -0.0092857 \cdot s^2 + 0.2007143 \cdot s - 0.1214286$ – 30ХГСА
 $V = 0.0019048 \cdot s^2 + 0.0419048 \cdot s + 0.8128571$ – Ст20
 $V = -0.0013095 \cdot s^2 + 0.0436905 \cdot s + 0.5842857$ – Д16
 10. Определены граничные условия эффективного применения виброгасящего удлинителя расточной оправки, позволяющие повысить режимы резания при растачивании:
 - при обработке заготовок из ст 20 допускается увеличить без потери качества глубину резания в 1,3 раза, и подачу в 1,3-1,4 раза
 - при обработке заготовок из 30ХГСА допускается увеличить без потери качества глубину резания в 1,33-1,42 раза, и подачу в 1,2-1,35 раза
 - при обработке заготовок из ВТ6 допускается увеличить без потери качества глубину резания в 1,64-1,67 раза, и подачу в 1,46 до 1,67 раза

11. Проанализирована себестоимость изготовления виброгасящего удлинителя расточной оправки и определена его рыночная стоимость, проведенный анализ ценовых показателей современных антивибрационных расточных оправок показал, что стоимость виброгасящего удлинителя в 10 раз ниже, чем у современных аналогов.
12. Произведено моделирование многофакторного эксперимента зависимости виброскорости от подачи и частоты вращения в программном модуле Matlab, позволяющей достигнуть увеличение шероховатости: от Ra 3,2 до Ra 0,8 для ст20, от Ra 3,2 до Ra 0,8 для стали 30ХГСА, от Ra 3,2 до Ra 0,8 для ВТ6 по сравнению с цельным удлинителем расточной оправки.

Основное содержание работ отражено в следующих публикациях:

1. A.V. Ignatov, S.V. Tagil'tsev, A.I. Namazova. Bore Making Using Vibration-Resistant Boring Arbors Assembled with the Use of Adhesive Materials // POLYMER SCIENCE. Series D. 2017. Vol. 10, No. 2. P. 106-110
2. A. V. Ignatov, S. V. Tagil'tsev, A. I. Namazova. The Application of Adhesive Technologies in the Assembly of Antivibration Boring Arbor // Polymer Science. Series D, 2018, Vol. 11, Issue 1, P. 20 – 23, DOI: 10.1134/S1995421218010082
3. Ignatov A. V., Tagiltsev S. V., Namazova A. I. Reducing Vibration of Boring Bar. AIP Conference Proceedings. Vol. 2171. American Institute of Physics Inc., 2019. AIP Conference Proceedings. Web. <https://doi.org/10.1063/1.5133329>
4. Ignatov A.V., Tagiltsev S.V., Namazova A.I. Improving Quality Of The Surface Layer During Boring. AIP Proceeding Conference,
5. Игнатов А.В. Тагильцев С.В., Намазова А.И. Обработка отверстий виброустойчивыми расточными оправками, собранными с использованием адгезивных материалов // Клеи. Герметики. Технологии. 2016. №12. С.16-20
6. Игнатов А.В., Намазова А.И., Тагильцев С.В. Применение клеевых технологий в сборке антивибрационных расточных оправок // Клеи. Герметики. Технологии. 2017. №8. С. 30-33.
7. Игнатов А.В., Родионова Н.А., Тагильцев С.В. Оригинальная классификация расточных оправок с эффектами виброгашения // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2019. №6. С.59-64.
8. Игнатов А.В., Тагильцев С.В., Намазова А.И. Обработка отверстий расточными оправками с эффектами виброгашения // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2016. №10. С.35-39
9. Игнатов А.В., Тагильцев С.В. Классификация расточных оправок с эффектами виброгашения // Главный механик. 2016. №9. С.30-35
10. Игнатов А.В., Намазова А.И., Тагильцев С.В. Разработка оригинального классификатора расточных оправок // Справочник Инженерный журнал с приложением. 2017. №7. С.23 – 27.