

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.922.025.048.6

**ЛУГОВОЙ**

**Игорь Вячеславович**

**РАЗРАБОТКА КОЛЬЦЕВЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ  
С ПЕРЕМЕННОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
ПРОШИВАНИЯ ОТВЕРСТИЙ В ХРУПКИХ МАТЕРИАЛАХ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

по специальности 05.02.07 – Технология и оборудование механической

и физико-технической обработки

Минск, 2017

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель **Минченя Владимир Тимофеевич**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета

Официальные оппоненты: **Рубаник Василий Васильевич**, доктор технических наук, член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, директор ГНУ «Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси»;

**Дежунов Николай Васильевич**, кандидат технических наук, зав. НИЛ «Ультразвуковые технологии и оборудование» УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация – ГНУ «Объединенный институт машиностроения» Национальной академии наук Беларуси

Защита состоится «22» сентября 2017 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости 65, корп.1, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «22» августа 2017 г.

Ученый секретарь совета по защите диссертаций Д02.05.03,  
доктор технических наук,  
профессор

\_\_\_\_\_ О.Г. Девойно

© Луговой И.В., 2017

© Белорусский национальный технический университет, 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Современное развитие приборостроения, электроники, ювелирной отрасли и др. создает предпосылки для разработки новых более производительных методов обработки хрупких материалов. К их числу относится ультразвуковой метод обработки отверстий малого диаметра в оптических деталях, ювелирных камнях, полупроводниковых материалах и пр., который осуществляется с использованием акустических систем с использованием стержневых концентраторов колебаний. К недостаткам подобных систем следует отнести узкий диапазон частот резонансных колебаний, требующий согласования с источником колебаний по частоте при изменении условий работы, а также большие габариты, что ограничивает их применение.

Одним из новых направлений, позволяющим расширить область применения ультразвуковой техники, является разработка акустических систем с упругими элементами в качестве резонаторов, волноводов и рабочих инструментов. Упругие элементы, обладая способностью накапливать потенциальную энергию и усиливать амплитуду колебаний, могут быть успешно использованы в ультразвуковой технике для решения различных технологических задач: обработки материалов резанием, сварки и пр.

Однако информация, посвященная разработке и применению акустических систем с упругими элементами весьма ограничена. К настоящему времени известны лишь несколько технических решений защищенных патентам на изобретение, демонстрирующих перспективность применения упругих элементов.

В связи с этим данный вопрос представляет научный и практический интерес и требует проведения теоретических и экспериментальных исследований, позволяющих обосновать возможность применения упругих элементов в ультразвуковых технологических системах в качестве концентраторов кольцевого типа с переменной жесткостью, определить их наиболее рациональную геометрическую форму и оптимальные размеры и тем самым обеспечить повышение интенсивности колебаний, расширить ширину резонансных частот колебаний, уменьшить габариты акустической системы и обеспечить универсальность практического применения.

Примером практического применения ультразвуковых систем с использованием кольцевых концентраторов, которые играют роль упругой связи между преобразователем и инструментом, может служить трудоемкий и широко распространенный в различных областях техники технологический процесс прошивания отверстий в хрупких материалах.

### **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

## **Связь работы с научными программами (проектами), темами**

Ряд результатов, составляющих содержание данной диссертационной работы, получен в рамках выполнения заданий по грантам: ГБ-42-11-240 по теме «Разработка высокоэффективных технологий, создание и совершенствование конструкций, методов контроля изделий приборостроения, ювелирного производства» (срок выполнения с 2010 по 31.12.2015), государственной программы ориентированных фундаментальных научных исследований «Повышение качества изделий приборостроения, медицинской техники и ювелирного производства на основе совершенствования технологий, конструкций, методов контроля и испытаний, медицинской и бытовой техники»; Т11ЛИТ-030 (2011–2012) «Теоретическое и экспериментальное исследование свойств эластичных биологических материалов при воздействии механических колебаний высокой частоты»; 4.1.08 «Разработка и исследование технологии задания формы материалам на основе никелида титана для получения изделий медицинского назначения», ГПНИ «Функциональные и композиционные материалы, наноматериалы» (2011–2015), подпрограммы «Материалы в технике».

Тема диссертационной работы соответствует приоритетному направлению фундаментальных и прикладных научных исследований Республики Беларусь на 2011–2015, утвержденному постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 19.04.2010 № 585 «Высокоэнергетические процессы в технологической среде и на границе раздела фаз при формообразовании, упрочнении, обработке и испытании материалов, формировании покрытий», и приоритетным направлениям (п. 7, системы и комплексы машин) научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020, утвержденным постановлением Совета Министров Республике Беларусь № 190 от 12.03.2015.

### **Цель и задачи исследования**

Цель работы – разработка кольцевых концентраторов с переменной жесткостью для ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах, обеспечивающих повышение производительности технологического процесса.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- теоретически и экспериментально обосновать форму концентратора кольцевого типа с переменной жесткостью, обеспечивающую повышение интенсивности колебаний за счет преобразования продольных колебаний в изгибные;
- исследовать влияние упругих перемещений концентраторов кольцевого типа на интенсивность колебаний инструмента, влияющих на повышение производительности прошивания отверстий;

– произвести компьютерный модальный и гармонический анализ для установления оптимальных амплитудно-частотных характеристик кольцевых концентраторов, обеспечивающих повышение коэффициента усиления амплитуды колебаний и образование резонансного режима работы акустической системы;

– исследовать динамику взаимодействия рабочего инструмента с заготовкой, с учетом которой разработать и исследовать математические модели основных процессов, протекающих при обработке отверстий;

– провести сравнительные экспериментальные исследования прошивания отверстий с использованием концентраторов кольцевого типа различных форм, обеспечивающих наибольшее повышение интенсивности в образцах из различных материалов.

### **Научная новизна**

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено положение о том, что концентраторы кольцевого типа позволяют обеспечить трансформацию колебаний акустической системы, повысить интенсивность колебаний рабочего инструмента за счет преобразования продольных колебаний в более интенсивные изгибные колебания в узком сечении кольца.

2. На основании анализа разработанной математической модели функционирования колебательной системы и результатов экспериментов установлено, что управление упругими характеристикам кольцевого концентратора позволяет изменять параметры динамического процесса взаимодействия инструмента с заготовкой для образования благоприятных условий виброударного режима работы инструмента в зоне резания и интенсификации процесса хрупкого разрушения материала.

3. Теоретическими расчетами упругих перемещений и компьютерным моделированием колебаний кольцевого концентратора установлена зависимость, позволяющая определить коэффициент усиления амплитуды колебаний в зависимости от соотношения толщин переменного сечения кольцевых концентраторов и частоты колебаний акустической системы.

4. На основании экспериментальных данных, отражающих влияние типоразмеров кольцевых волноводов на интенсивность обработки образцов из хрупких неметаллических материалов, установлены рациональные геометрические формы и оптимальные размеры кольцевых концентраторов кольцевого типа и рабочего инструмента, обеспечивающие наибольшую скорость выполнения операции прошивания отверстий.

### **Положения, выносимые на защиту**

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований упругих концентраторов кольцевого типа, используемых в качестве

дополнительных источников потенциальной энергии, устанавливающие зависимость между их типоразмерами и величин упругих перемещений, позволяющие обосновать кольцевую форму концентратора с переменной жесткостью как наиболее рациональную, обеспечивающую повышение интенсивности колебаний инструмента.

2. Результаты теоретических и экспериментальных исследований концентратора кольцевого типа с прикрепленным инструментом, устанавливающие зависимость коэффициента усиления амплитуды колебаний от соотношений толщин  $N$  кольца на входе и выходе и соотношения диаметров наружного и внутреннего диаметров кольца  $K_d = \frac{D}{d}$ , что позволило обосновать оптимальные размерные характеристики концентратора и инструмента, определяемые для кольцевого концентратора из условия соблюдения соотношений диаметров  $1,3 > K_d > 1,15$ .

3. Результаты теоретического анализа и численного расчета компьютерных моделей, образованных из кольцевого концентратора с прикрепленным инструментом, выполненного в системе конечно-элементного анализа ANSYS, по оценке влияния частоты вынужденных колебаний и геометрических параметров на амплитуду колебаний инструмента, позволившие установить создания шести - девяти резонансных режимов работы ультразвуковой системы, позволяющих увеличить рабочий диапазон частот ультразвуковой технологической системы по сравнению с традиционной поршневой акустической системой, работающей в режиме одной установленной резонансной частоты, обеспечив при этом повышение интенсивности колебаний инструмента.

4. Результаты теоретических и экспериментальных исследований влияния амплитуды колебаний в кольцевом концентраторе на производительность обработки, позволившие обосновать повышение линейной производительности прошивания отверстий с применением кольцевых концентраторов с переменной жесткостью в результате усиления импульса силы в динамических процессах, протекающих в зоне обработки за счет действия упругих характеристик кольцевого концентратора при одновременном усилении амплитуды ультразвуковых колебаний и частотной модуляции акустической системы.

5. Результаты сравнительных экспериментальных исследований по оценке влияния видов кольцевых концентраторов на показатели точности формы и размеров, а также на качество поверхности отверстий, что позволило установить, что использование кольцевых концентраторов с переменной жесткостью не оказывает влияния на перечисленные показатели вследствие одинакового механизма разрушения хрупкого материала при абразивной виброударной обработке.

### **Личный вклад соискателя ученой степени**

Соискателем разработаны конструкции кольцевых концентраторов и математические модели упругих элементов кольцевого типа, предназначенных для ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах; выявлены и описаны особенности динамики взаимодействия колебательной системы, состоящей из упругого элемента с прикрепленным инструментом с обрабатываемой поверхностью; разработана методика и проведены экспериментальные исследования по оценке влияния акустических характеристик упругих концентраторов и технологических факторов на производительность процесса ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах; разработано оборудование для практической реализации; сформулированы основные выводы и положения диссертации.

Научный руководитель, канд. техн. наук, профессор Минченя В.Т. участвовал в определении цели и задач, обсуждении результатов исследований, написании статей и заявок на патенты, оказывал консультативную и практическую помощь на всех этапах выполнения диссертации. Канд. техн. наук, доцент Луговой В.П. принимал участие в обосновании применения упругих колец в качестве согласующего резонатора акустической системы. Канд. техн. наук, доцент Степаненко Д.А. и канд. техн. наук, старший преподаватель Пронкевич С.А. принимали участие в компьютерном моделировании акустической системы для оценки формы собственных колебаний упругого кольца. Совместно с д-ром техн. наук, профессором Босаковым С.В. разрабатывалась математическая модель, и производился расчет упругих перемещений кольцевых концентраторов, позволяющих повысить интенсивность колебаний.

### **Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов**

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих международных научно-технических конференциях: на 2–9-й международных научно-технических конференциях «Наука образованию, производству, экономике» в 2008–2015 гг. в БНТУ в Минске; на международных научно-технических конференциях «Приборостроение» в 2008–2014 гг. в БНТУ; на международной конференции «Электрон-фотонные и спиновые взаимодействия, инициированные быстрыми заряженными частицами, электромагнитными полями, электрическими токами и СВЧ-излучением в макроскопических проявлениях на обычных и наноматериалах» в Туапсе в 2012 г.; VIII международной конференции «Перспективы развития науки и образования» Таджикского технического университета в Душанбе в ноябре 2016 г.

### **Опубликование результатов диссертации**

Основные результаты диссертации опубликованы в 29 научных работах, в том числе в 6 статьях в рецензируемых научных журналах, соответствующих п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 1,5 авторских лист, а также в 10 статьях в сборниках материалов конференций, 5 тезисах докладов на научных конференциях, 3 других научных публикаций и получено 5 патентов.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка из 89 наименований (в том числе 22 публикаций соискателя), изложенного на 26 страницах и 6 приложений на 28 страницах. Полный объем – 176 страниц, в том числе 134 страницы основного текста, содержащего 119 рисунка (на 20 с.) и 7 таблиц (на 3 с.).

## **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

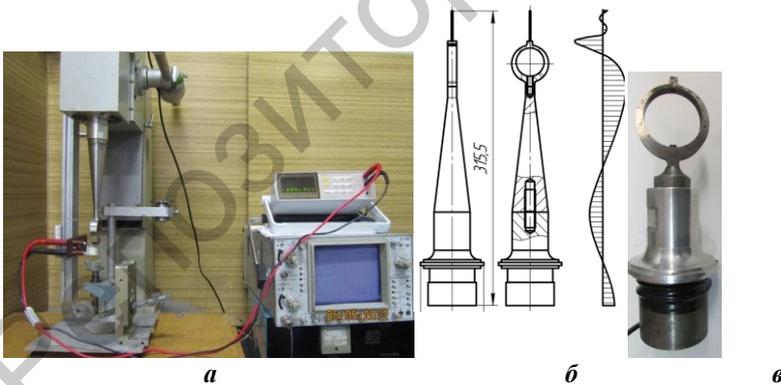
**Во введении** обоснована актуальность выбранной темы, обозначены цель и задачи исследования.

**В первой главе** даны обзор и анализ литературных данных по классификации упругих элементов и их использованию в технике, в том числе в ультразвуковых системах, а также результаты исследований по ультразвуковой обработке отверстий в хрупких неметаллических материалах. Особое внимание уделено вопросу применения упругих элементов в вибрационных механизмах, машинах, а также в акустических системах, что обусловлено их способностью накапливать, усиливать и передавать энергию исполнительному органу.

Показано, что метод ультразвуковой абразивной обработки позволяет получить высокую точность и качество поверхности обработанных отверстий, возможность получения отверстий различной формы. Для этой цели используют типовые акустические системы, содержащие концентратор ультразвуковых колебаний поршневого типа. Установлено, что основные принципы механизма ультразвукового прошивания заключаются в динамических процессах взаимодействия инструмента и заготовки, которые могут иметь ударный и безударный характер. Установлено, что показатели обработки зависят от взаимосвязанных акустических и технологических факторов: частоты и амплитуды колебаний, усилия прижима, вида и зернистости абразива, свойств обрабатываемого материала, площади обработки, концентрации суспензии.

Вместе с тем показано, что вопрос о применении упругих элементов в ультразвуковых системах изучен недостаточно. Он ограничен лишь описаниями нескольких ультразвуковых устройств, рекомендованных для решения технологических задач. В связи с этим данный вопрос требует проведения дальнейших поисковых комплексных теоретических и экспериментальных исследований для разработки рациональных форм и конструкций упругих концентраторов; их геометрических параметров. На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы, направленные на исследование эффективности применения упругих кольцевых концентраторов для одной из трудоемких технологических операций – обработки отверстий в хрупких неметаллических материалах.

**Во второй главе** приводятся методика проведения экспериментальных исследований и описание конструкции экспериментальной установки, позволяющей оценить влияние акустических и технологических факторов на производительность прошивания отверстий в хрупких материалах, испытываемые материалы и образцы. Акустическая система с кольцевым концентратором показана на рисунке 1.



**а** – экспериментальная ультразвуковая установка;  
**б** – схема акустической системы с коническим волноводом и кольцевым концентратором;  
**в** – акустическая система с кольцевым концентратором  
**Рисунок 1.** – Общий вид экспериментальной установки и акустических систем с кольцевым концентратором

Акустическая система состоит из пьезокерамического преобразователя продольных колебаний типа Ланжевена, конического волновода, к которому прикреплен упругий концентратор с рабочим инструментом. Питание ультразвукового преобразователя осуществлялось от генераторов с максимальной выходной мощностью 240 Вт с различными диапазонами регулирования частот колебаний: 16–24 и 30–44 кГц. В качестве упругих элементов использовались кольцевые концентраторы различной формы: круглые кольца с постоянным и переменным сечением; плоскопараллельными сторонами с постоянным и переменным сечением. Были испытаны упругие концентраторы из стали 45 и титанового сплава ВТ1, которые обладают упругостью, прочностью и акустическими свойствами. Рабочим инструментом служила длинномерная игла (стержень), изготовленная из пружинной стали 65Г.

В качестве испытуемых образцов для обработки использовались хрупкие неметаллические материалы с различной твердостью: листовое стекло марки М7 ГОСТ111–2001 с твердостью по шкале Мооса 6,0 и другие хрупкие материалы с различной степенью твердости: серпентинит, оникс и яшма толщиной  $8 \pm 0,1$  мм. В качестве водно-абразивной суспензии использовалась механическая взвесь, состоящая из 40 % абразивного порошка карбида кремния черного зернистостью 80-Н ГОСТ3647–80 и 60 % технической воды, рекомендованной для работы в промышленных ультразвуковых установках.

При проведении экспериментальных исследований контролировались упругие характеристики концентраторов, амплитуда ультразвуковых колебаний кольцевого концентратора и инструмента, частота колебаний акустической системы, температура на упругих элементах, время обработки, размеры и качество обработанной поверхности отверстий.

Упругие характеристики измерялись с помощью микрометрической головки в специально изготовленном приспособлении. Амплитуда механических колебаний рабочего инструмента измерялась контактным методом микроиндикатором модели ИРП13, а также оптическим методом с помощью светового микроскопа с увеличением в пределах 300–400<sup>x</sup> с точностью 1 мкм. Оценка величины и характера распределения амплитуды колебаний вдоль оси стержневого инструмента, присоединенного к кольцевому концентратору, производилась индукционным методом по электродвижущей силе (ЭДС), измеренной универсальным вольтметром В7-68. Экспериментальное исследование колебаний концентратора с инструментом выполнено с помощью лазерного интерферометра в Центре механотроники Каунасского технологического университета и холдинга ОАО «Планар» (г. Минск).

Экспериментальное определение амплитуды колебаний в стержневом инструменте осуществлялось косвенно измерением механических напряжений индукционным датчиком, работа которого основана на действии эффекта обратной магнитострикции. Измерение осуществлялось перемещением инструмента в сквозном отверстии неподвижной катушки индуктивности.

Уровень температуры кольцевого концентратора измерялся контактным методом цифровым мультиметром модели VC9805A с помощью термомпары хромель-копель.

Сравнительная оценка производительности ультразвукового прошивания отверстий с традиционным методом обработки образцов из стекла осуществлялась количественно по показателю линейной производительности, рассчитываемой по формуле  $V = l / t$ .

Качество поверхности обработанного отверстия оценивались на приборе для измерения шероховатости модели Teylor Hobson. Состояние топографии отверстия оценивалось микроскопом МПС У-1, оснащенный цифровой фотокамерой.

**В третьей главе** приведено теоретическое обоснование практического использования кольцевых элементов с переменной жесткостью в качестве концентраторов колебаний. Выполненные теоретические расчеты основаны на допущении о том, что положительный эффект от использования кольцевых элементов достигается в результате накопления потенциальной энергии, которая зависит от упругих характеристик и перемещений под действием внешних сил. В основе расчетов и анализа лежит известное положение о том, что упругие перемещения в пружине являются характеристикой количества накопленной потенциальной энергии, которая выражается формулой  $\Pi = ku^2/2$ , где  $k$  и  $u$  – соответственно коэффициент упругости и перемещение при сжатии пружины.

Обосновано использование кольцевых концентраторов эллиптической и круглой формы с переменной жесткостью диаметром от 30 до 60 мм, как наиболее оптимальной конфигурации с точки зрения технологичности изготовления и способности увеличения амплитуды колебаний.

Расчетная схема колебательной системы представлена в виде пружины и стержня ограниченной длины. Общее линейное перемещение такой системы складывается из двух составляющих: статического перемещения  $u_c$ , вызванного действием силы предварительного прижатия  $P$ , и динамического перемещения  $u_d$ , вызванного действием периодической силы  $P_d$ :

$$u = u_c + u_d . \quad (1)$$

Статическое перемещение в свою очередь складывается из упругой деформации сжатой пружины  $u_{01}$  и упругого перемещения  $u_x$  самого стержня по всей длине, т. е.  $u_c = u_{01} + u_x$ .

Статические перемещения стержня в произвольном сечении зависят от упругой характеристики  $k$  сжатой пружины:

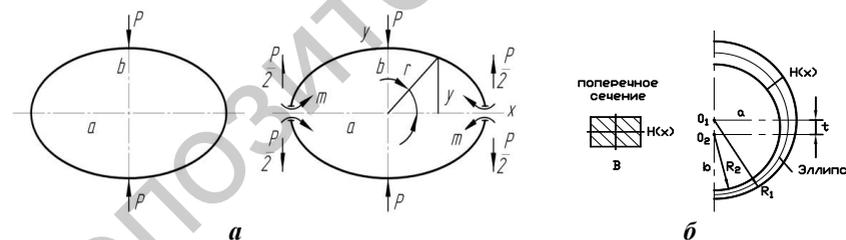
$$u_c(x) = \frac{P}{k} + \frac{Px}{EF} = \frac{P}{EF} \left( \frac{EF}{k} + x \right). \quad (2)$$

Динамические перемещения свободного конца стержня  $u_{д.}$ , прикрепленного к упругой пружине, рассчитываются по формуле

$$u_{д.}(x,t) = -\frac{8P_0l}{\pi^2 EF} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^{n+1}}{(2n+1)^2} \sin \frac{\pi(2n+1)x}{2l} \cos \frac{\pi(2n+1)ct}{2l}, \quad (3)$$

где  $n$  – количество степеней свободы стержня.

Предварительный расчет упругих перемещений кольца под действием двух сил  $P$ , действующих вдоль оси  $y$ , был выполнен для эллиптического кольца с постоянной изгибной жесткостью  $EI$  с полуосями  $a$  и  $b$  (рисунок 2, *a*). Круглое кольцо может быть легко преобразовано в круговое при условии, что  $a = b$ .



***a* – обобщенная схема и схема действия сил на упругое кольцо постоянного сечения; *б* – эллиптическое кольцо с переменным сечением и расчетная схема в полярных координатах**

**Рисунок 2. – Расчетная схема эллиптического кольца**

В результате расчета перемещений для произвольной точки кольца, заданной в полярной системе координат  $x = \cos \varphi$ ,  $y = \sin \varphi$ , основанного на теореме Кастильяно, была получена формула, показывающая, что наибольшего значения упругие деформации достигают в точках приложения сосредоточенных сил вдоль оси  $y$ :

$$u_c = \Delta_{1p} = \frac{Pa^3}{45EI} \frac{5(3\frac{b^4}{a^4} + \frac{b^6}{a^6} - 4) + 3\frac{b^2}{a^2}[(8 - 3\frac{b^2}{a^2} - 2\frac{b^4}{a^4})E(1 - \frac{a^2}{b^2}) + (\frac{b^2}{a^2} - 4)E(1 - \frac{a^2}{b^2})]}{\frac{b}{a}(1 - \frac{b^2}{a^2})E(1 - \frac{a^2}{b^2})}, \quad (4)$$

из которой следует, что величина перемещений зависит от жесткости поперечного сечения кольца и размеров полуосей  $a$  и  $b$ .

Был также произведен расчет упругих перемещений эллиптического кольца с переменным сечением (рисунок 2, б), который геометрически образуется из двух эллипсов с полуосями  $a_1$  и  $a_2$ , а также  $b_1$  и  $b_2$ , смещенных друг относительно друга на величину  $t$ . В результате расчета была получена формула, позволяющая оценить влияние жесткости поперечного сечения и геометрических параметров кольца на величину упругих перемещений:

$$u = \frac{3Pb^2}{Ebc^3} \int_0^\pi \left[ \sin \phi - \frac{4\sqrt{1 - \frac{t^2}{c^2}}}{\pi(2 + \frac{t^2}{c^2})} \sqrt{\frac{a^2}{b^2} \cos^2 \phi + \sin^2 \phi} \frac{d\phi}{(1 - \frac{t}{c} \cos \phi)^3} \right]. \quad (5)$$

Полученные результаты численного расчета представлены в виде графиков зависимости упругих перемещений от действия статической силы в пределах до  $P = 1000$  Н для различных значений внешнего и внутреннего диаметров, толщины сечения кольца и величины межосевого смещения.

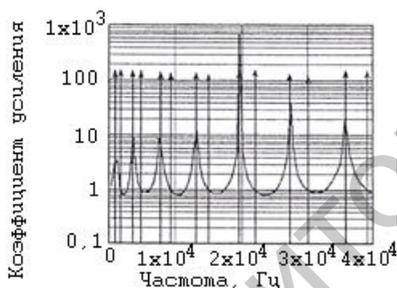
Эффективность применения кольцевого концентратора характеризуется величиной коэффициента усиления амплитуды колебаний, который определяется как модуль отношения амплитуды  $\xi_1$  на входе к амплитуде  $\xi_0$  на выходе концентратора  $K = \xi_1 / \xi_0$ .

Теоретический анализ колебаний кольца в диапазоне вынужденных колебаний  $f = 20\text{--}40$  кГц, выполненный с помощью метода конечных элементов с использованием компьютерной программы ANSYS, позволил установить влияние его размерных параметров и формы на акустические характеристики, и сделать вывод о том, что кольцевой концентратор с переменным сечением позволяет усилить амплитуду колебаний. В качестве примера были рассмотрены модели колец с наружным диаметром 50 и 38 мм для различных значений смещения оси и размера внутреннего диаметра кольца. В результате анализа установлено, что коэффициент усиления амплитуды колебаний  $N$  зависит от двух взаимосвязанных параметров: коэффициента диаметра, определяемого как отношение наруж-

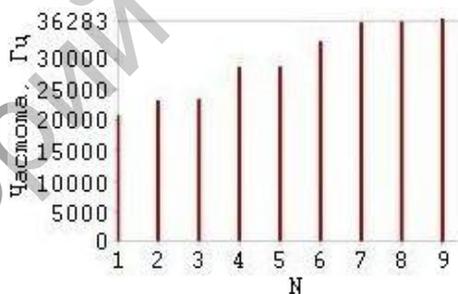
ного и внутреннего диаметров  $K_d = D/d$ , и коэффициента толщины, равного отношению толщин сечения кольца  $N = t_1 / t_2$ . При этом оптимальные размеры кольца, обеспечивающие наибольшую амплитуду колебаний, будут достигнуты, если соблюдается соотношение диаметров

$$1,3 > K_d > 1,15.$$

Гармонический анализ был проведен для двух вариантов колец: для модели кольца с постоянным сечением наружным диаметром  $D = 38$  мм и толщиной  $h = 1$  мм, а также для модели кольца с переменным и постоянным сечением наружным диаметром 50 мм. Полученные результаты численных расчетов показали, что кольцевые концентраторы в рассматриваемом диапазоне частот колебаний до 40 кГц имеют несколько пиков резонансных частот, которым соответствуют максимальные значения коэффициента усиления амплитуды колебаний (рисунки 3 и 4).

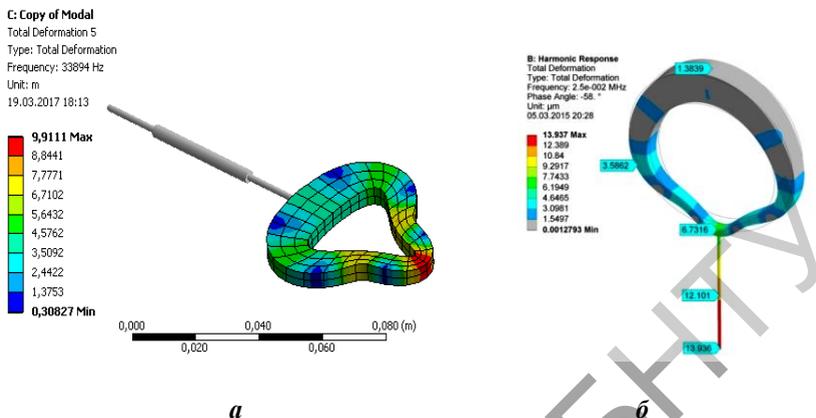


**Рисунок 3. – Гармонический анализ кольцевого волновода с постоянным сечением**



**Рисунок 4. – Гармонический анализ кольцевого концентратора с переменным сечением**

Модальный анализ частоты собственных колебаний кольцевых концентраторов, работающих в диапазоне 18–43 кГц, выявил различные формы мод колебаний в зависимости от частоты вынужденных колебаний и размеров колец, визуально демонстрируя зоны узлов и пучностей изгибных колебаний и участки с максимальной амплитудой колебаний (рисунок 5, а). Установлено, что число узловых зон (которое может быть четным и нечетным) зависит от частоты вынужденных колебаний, а наибольшая амплитуда колебаний возбуждается в наиболее тонких сечениях кольца, которое можно получить сужением поперечного сечения кольца с двух сторон по ширине и толщине (рисунок 5, б).



**Рисунок 5. – Моды изгибных колебаний кольцевых концентраторов**

Полученные результаты позволили найти новые технические решения для достижения больших значений коэффициента усиления применением кольцевых концентраторов, в виде устройств (патенты Республики Беларусь № 8458, 8459, 8169, 19108, 19219) с использованием упругих элементов в качестве концентраторов ультразвуковых систем. Предложенные схемы позволяют упростить конструкцию и уменьшить габаритные размеры ультразвуковых систем.

Теоретический расчет динамической модели ультразвуковой системы с промежуточным упругим элементом позволил получить математические модели и теоретические зависимости, которые показали, что кольцевые концентраторы, обладающие упругими свойствами, благоприятно влияют на динамические процессы, протекающие в условиях виброударного режима работы инструмента. Результаты теоретического анализа динамических процессов, протекающих в зоне контакта инструмента с заготовкой, проведенного с использованием компьютерных программ, представлены в виде осциллограмм гармонических колебаний инструмента в условиях частотной модуляции, соответствуют осциллограммам, полученным при проведении экспериментальных исследований. Выполненный теоретический анализ позволяет определить условия для создания оптимальных режимов работы колебательной системы и управлять ими для достижения наилучшего результата. По результатам анализа динамической модели, предложено новое техническое решение в виде устройства с упругой опорой под заготовкой, позволяющее управлять динамическими процессами при ультразвуковой обработке, путем изменения упругих характеристик этой опоры.

**Четвертая глава** посвящена экспериментальным исследованиям по оценке влияния кольцевых концентраторов на эффективность процесса ультразвукового прошивания отверстий. Исследованы акустические характеристики кольцевых концентраторов, а также влияние технологических факторов на показатели ультразвукового прошивания отверстий в исследуемых образцах.

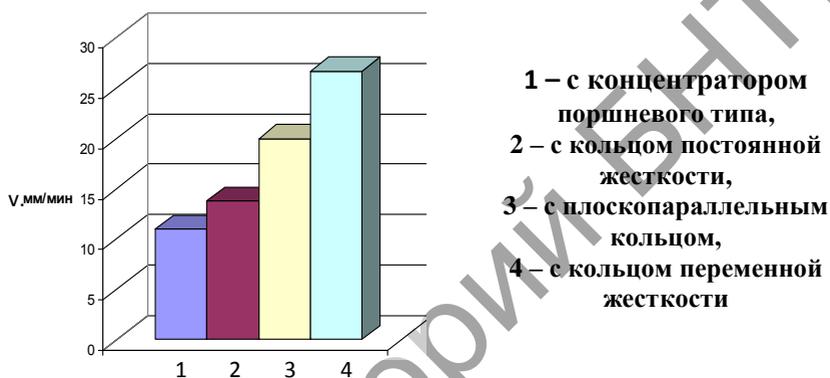
Сравнение акустических свойств кольцевых концентраторов различных форм и типоразмеров показало, что наибольший коэффициент усиления амплитуды колебаний достигается в круглых кольцевых концентраторах с переменной жесткостью, позволяющие сконцентрировать энергию излучения и получить наибольшие значения амплитуды колебаний в сечении с минимальной толщиной и тепловых излучений. Об этом свидетельствует совпадение форм эпюр тепловых и акустических излучений. Наибольшего уровня (до 40° С) температура кольца достигает через 3 мин работы в области пучности колебаний.

Необходимым условием осуществления прошивания отверстий на большую глубину является поддержание стабильного уровня амплитуды колебаний инструмента в ультразвуковой системе в изменяющихся условиях обработки, т. е. увеличение глубины обработки, изменение параметров среды (плотности и концентрации абразивной суспензии, вязкости); износ инструмента, абразивных зерен и т. п. Это условие может быть достигнуто различными способами: повышением интенсивности колебаний за счет пульсации выходного напряжения; осуществлением частотной модуляции в ультразвуковых генераторах либо модуляцией импульсной работы, осуществить которую в узком диапазоне резонансных частот с помощью преобразователей мозаичного типа достаточно сложно. Перспективным способом решения этой проблемы является метод частотной модуляции изменением параметров ультразвуковой системы, которые могут быть достигнуты в результате применения кольцевых концентраторов. Это позволяет создать благоприятные условия для виброударного режима работы инструмента в зоне обработки в спектре действия низко- и высокочастотных колебаний. Данное положение экспериментально подтверждено на зарегистрированных осциллограммах колебаний инструмента, которые демонстрируют сложную гармонику колебаний во всех случаях применения исследуемых кольцевых концентраторов.

Основными факторами, влияющими на производительность и точность обработки, в условиях виброударного режима работы рабочего инструмента являются два взаимосвязанных фактора: амплитуда колебаний стержневого инструмента и статическая нагрузка, которая может вызвать потерю продольной устойчивости длинномерного стержневого инструмента. Для оценки влияния первого фактора был проведен косвенный метод измерения распределения амплитуды колебаний, оцениваемый величиной

магнитной проницаемости в стержневом инструменте при действии продольной силы. Она показала, что существует область оптимальной длины рабочего инструмента, в которой обеспечивается наибольшая интенсивность колебаний в рабочей зоне. Так, например, для инструмента диаметром 0,6 мм оптимальная длина лежит в интервале от 40 до 80 мм.

Сравнительная оценка линейной производительности прошивания отверстий диаметром 0,6 мм с использованием концентраторов различного типа показала, что наилучшие результаты были получены при работе с кольцевыми концентраторами с переменной жесткостью (рисунок 6).



**Рисунок 6. – Производительность прошивания отверстий при обработке с концентраторами различных типов**

Сравнительные эксперименты влияния технологических факторов на производительность прошивания отверстий показали, что существует область оптимальных размеров абразивных зерен, которые лежат в пределах 40 – 80 мкм. Сравнительные исследования по производительности прошивания выявили зависимость данного показателя от твердости обрабатываемых материалов (стекла и ювелирных камней с различной твердостью): с повышением твердости материала по шкале Мооса от 3 до 7 производительность обработки снижается в 2,5 раза.

Результаты измерений точности размеров и формы отверстий показали, что отклонение формы по круглости (овальности) на выходе отверстия составляет 0,02 мм; угол отклонения в продольном сечении (конусность) не превышает 5°, а линейное отклонение в продольном направлении – менее 0,1 мм.

Качество поверхности оценивалось визуально и количественно по величине шероховатости, измеренной в продольном направлении отверстия, на образце из стекла, обработанного абразивом из карбида кремния

зернистостью 80 мкм. Результаты измерений показали, что высота микронеровности  $Ra$  не превышает 10 мкм и данный показатель несущественно отличается от результатов при обработке отверстий акустической системой традиционного типа.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено положение о том, что использование упругих кольцевых элементов в ультразвуковых системах в качестве концентраторов ультразвуковых колебаний обеспечивает передачу и усиление накопленной потенциальной энергии рабочему инструменту и позволяет использовать их для процесса прошивания отверстий в хрупких неметаллических материалах в диапазоне частот  $f = 20\text{--}44\text{кГц}$  [1, 4, 5, 9, 10, 12, 13, 15, 17, 27].

2. По результатам теоретических и экспериментальных исследований различных типоразмеров кольцевых волноводов определена наиболее рациональная форма концентратора кольцевого типа с переменной жесткостью, выполненного в форме круглого кольца или эллипса. Установлено, что упругие характеристики круглого и эллиптического упругого кольца зависят от размера полуосей, диаметра и толщины сечения. Полученные результаты численных расчетов и результаты экспериментальных исследований исследуемых колец различных форм и размеров, изготовленных из стали и титанового сплава диаметром 25–60 мм, указывают, что упругие перемещения при действии сжимающей силы в пределах до  $P = 100\text{ Н}$  достигают 5–15 мкм [3, 6, 9, 11, 18, 25, 29].

3. По результатам теоретического анализа с использованием программы ANSYS компьютерной модели кольцевого концентратора и рабочего инструмента, а также экспериментальных измерений амплитуды ультразвуковых колебаний и температурных полей установлены волновые закономерности изменения амплитуды колебаний, позволяющие определить зоны наибольшей интенсивности колебаний. Установлено, что величина амплитуды колебаний зависит от геометрической формы и размеров кольцевого концентратора и достигает наибольших значений в его наиболее тонком сечении. В результате компьютерного моделирования и численного расчета коэффициента усиления  $K$  амплитуды колебаний в кольцевом концентраторе диаметром 50 мм установлено, что его величина определяется соотношением толщин кольца  $N = t_1/t_2$  в диагональном сечении и соотношением диаметров кольца  $K_d = D/d$ . Установлено, что оптимальные размеры круглого кольцевого концентратора определяются из условия  $1,3 > K_d > 1,15$ .

Теоретический анализ и расчет, выполненный для стального образца диаметром 38 мм, показал, что коэффициент усиления амплитуды ко-

лебаний достигает  $K = 5$ . Результатами теоретических и экспериментальных исследований характера распределения амплитуды колебаний вдоль оси инструмента диаметром 0,6 – 1 мм установлено, что наибольшая производительность обработки достигается в области пучности ультразвуковой волны на длине 40 – 120 мм в области пучности ультразвуковой волны [4, 6, 18].

4. По результатам модального и гармонического анализа и численного расчета разработанной компьютерной модели кольцевого концентратора с прикрепленным рабочим инструментом, выполненных в системе конечно-элементного анализа ANSYS, исследован диапазон частот колебаний ультразвуковой системы с кольцевыми концентраторами в пределах 20–44 кГц, который позволил установить несколько ступеней с резонансными частотами колебаний, что создает благоприятные условия для работы ультразвуковой системы в широком частотном диапазоне. В частности, установлено, что кольцевой концентратор диаметром 50 мм с различными размерами внутреннего диаметра в диапазоне ультразвуковых колебаний частотой 18–40 кГц имеет до девяти ступеней резонансных колебаний, позволяя тем самым расширить область применения ультразвуковых систем для решения различных технологических задач [4, 11, 14, 23].

5. Теоретически и экспериментально подтверждено, что применение кольцевых концентраторов с переменной жесткостью позволяет изменить динамические процессы в зоне контакта инструмента с заготовкой в результате повышения интенсивности колебаний за счет увеличения скорости и ускорения колебательных движений рабочего инструмента, а также частотной модуляции кольца с переменным сечением, что в итоге позволило достигнуть повышения производительности процесса прошивания отверстий в исследуемом материале в 3–3,5 раза по сравнению с традиционным способом прошивания, а по сравнению с кольцом с одинаковой жесткостью в 2 раза. Установлено, что основными технологическими факторами, влияющими на производительность ультразвукового прошивания отверстий являются твердость обрабатываемого материала и размер абразивных зерен. Показано, что изменение твердости исследуемых образцов с 3 до 7 единиц по шкале Мооса приводит к изменению линейной производительности прошивания отверстий с 25 до 10 мм/мин, а наилучшие условия для прошивания достигаются при обработке абразивными зёрнами размером 60–100 мкм [2, 7, 8, 9, 21, 22, 26, 28].

6. Результаты экспериментальных исследований по оценке влияния кольцевых концентраторов на показатели точности формы и размеров, а также на качество поверхности отверстий позволили установить,

что использование кольцевых концентраторов с переменной жесткостью не вызывает изменений этих показателей по сравнению с традиционным способом обработки вследствие сохранения основных принципов разрушения хрупкого материала в условиях абразивной виброударной обработки. В частности, установлено, что точность отверстий в образцах из стекла диаметром 0,6 мм составила: по отклонению формы по круглости (овальности) на выходе отверстия 0,02 мм; по углу отклонения в продольном сечении (конусности) – не более 5°, а по линейному отклонению в продольном направлении – менее 0,1 мм. При этом значение параметра шероховатости образцов  $Ra$ , по сравнению с обработкой в обычных условиях, не отличается от ее значения, соответствующего обычным условиям обработки. На основании экспериментальных исследований установлено, что шероховатость зависит в основном от размера абразивных зерен и в частности при обработке стекла карбидом кремния зернистостью 60–100 мкм достигает величины  $Ra = 2,5–10$  мкм [16, 19, 20, 24].

#### **Рекомендации по практическому использованию результатов**

1. Разработанные концентраторы кольцевого типа с переменной жесткостью (патенты на изобретение «Ультразвуковой инструмент для обработки или измерения детали» № 19219, «Ультразвуковой инструмент для обработки отверстий» № 8169) [29, 25], позволяющие повысить производительность обработки заготовок из хрупких материалов в 2–3,5 раза, могут быть использованы в оптическом и ювелирном производстве, электронной промышленности, а также в производстве изделий из фарфора и керамики, сварки пластмасс, тиснения кожи и пр.

2. В результате производственных испытаний опытной партии ювелирно-поделочных камней, проведенных в ООО «Фацет», было установлено, что применение кольцевых концентраторов позволяет повысить производительность прошивания в заготовках из фианита, аметиста, сердолика в два раза по сравнению с традиционным способом, при этом отклонение формы по круглости на выходе отверстия составило 0,02 мм, по углу отклонения в продольном сечении – не более 5°, а по линейному отклонению в продольном направлении – не менее 0,1 мм.

3. Результаты исследований внедрены в учебный процесс подготовки инженерных кадров по специальности 1 - 52 02 01 «Технология и оборудование ювелирного производства».

4. Разработанные конструкции кольцевых концентраторов с переменной жесткостью для акустических систем технологического назначения приняты для производства на УП «Научно-технический парк БНТУ «Политехник».

## Список публикаций соискателя ученой степени

### Статьи в рецензируемых научных изданиях

1. Луговой, И.В. Повышение эффективности процесса обработки отверстий малого диаметра путем использования дополнительных видов энергии / И.В. Луговой // Вестник БНТУ. – 2011. – № 6. – С. 31–35.
2. Луговой, И. В. Динамика колебаний стержня, прикрепленного к упругому элементу / И.В. Луговой, В.П. Луговой // Наука и техника – 2013. – № 1. – С. 13–18.
3. Босаков, С.В. К определению перемещений в упругом эллиптическом кольце / С.В. Босаков, И.В. Луговой // Наука и техника, – 2013. – № 3. – С. 59–62.
4. Разработка и исследование нового типа концентраторов ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов / Д.А. Степаненко, В.Т. Минченя, В.П. Луговой, И.В. Луговой // Материалы, технологии, инструменты. – 2013. – т. 18, № 2. – С. 90–94.
5. Луговой, И.В. Упругие характеристики кольцевых концентраторов ультразвуковых систем / И.В. Луговой, В.П. Луговой // Наука и техника. – 2014. – № 3. – С. 24–27.
6. Степаненко, Д.А. Влияние формы кольцевого концентратора ультразвуковой системы на коэффициент усиления амплитуды колебаний / Д.А. Степаненко, И.В. Луговой, В.П. Луговой // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 3.– С. 209–215.

### Другие научные издания

7. Босаков, С.В. К вопросу о теоретическом исследовании двухмассовой акустической системы / С.В. Босаков, И.В. Луговой // Теоретическая и прикладная механика – 2012. – Вып. 27. – С. 167–170.
8. Луговой, И.В. Теоретическое исследование двухмассовой акустической системы с упругим элементом / И.В. Луговой // Наука и техника. – 2012. – № 5. – С. 87–91.
9. Луговой, В.П. Прошивание отверстий в ювелирных камнях с использованием ультразвуковых систем с кольцевыми концентраторами / В.П. Луговой, В.Т. Минченя, И.В. Луговой // Электронное научное издание «Дизайн. Теория. Практика». – М.: МГУПИ, 2015. – Вып. 22. – С. 36–44.

### Материалы конференций

10. Луговой, И.В. Об использовании упругих элементов в ультразвуковых технологических установках / И.В. Луговой, В.Т. Минченя, В.П. Луговой // Приборостроение 2011: материалы 4-й Международной научно-технической конференции, Минск, 16–18 ноября 2011 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2011. – С. 359–361.

11. Луговой, И.В. Анализ форм колебаний упругих элементов в ультразвуковых акустических системах / И.В. Луговой // Приборостроение 2012: материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск; 21–23 ноября 2012 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 324–325.

12. Луговой, И.В. Использование упругих элементов в ультразвуковых системах / И.В. Луговой, В.П. Луговой // Приборостроение 2012: материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск; 21–23 ноября 2012 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 325–327.

13. Луговой, И.В. Анализ динамических процессов колебательных систем с упругими элементами / И.В. Луговой, В.П. Луговой, В.Т. Минченя // Приборостроение–2012: материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск, 21–23 ноября 2012 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2012. – С. 327–328.

14. Луговой, И. В. Повышение эффективности процесса ультразвуковой прошивки отверстий путем использования упругих концентраторов-волноводов / И.В. Луговой, В.Т. Минченя, В.П. Луговой // Приборостроение 2012: материалы 5-й Международной научно-технической конференции, Минск, 21–23 ноября 2012 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, БНТУ, 2012. – С. 328–330.

15. Луговой, И.В. Применение упругих концентраторов-волноводов при ультразвуковой обработке отверстий / И.В. Луговой, В.Т. Минченя // Влияние внешних энергетических воздействий на структуру, фазовый состав и свойства материалов: Материалы Международной конференции, Новокузнецк, 2012 г. / под ред. Громова В.Е. – Новокузнецк: Изд-во «СибГИУ», 2012. – С.150–153.

16. Луговой, И.В. Влияние новых концентраторов на повышение производительности ультразвуковой прошивки хрупких материалов / И.В. Луговой, В.Т. Минченя // Приборостроение–2013: материалы 6-й Международной научно-технической конференции, Минск, 20–22 ноября 2013 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 334–335.

17. Increase of productivity in brittle material processing by the application of intermediate elastic elements in tool structure / I. Lugovoj, V. Minchenya, G. Baurienè, A. Bubulis, K. Pilkauskas. // Vibroengineering PROCEDIA. – 2014. – Vol. 3. – P. 175–179.

18. Степаненко, Д.А. Концентраторы ультразвуковых колебаний на основе кольцевых упругих элементов с некруглым эксцентричным профилем / Д.А. Степаненко, В.П. Луговой, И.В. Луговой // Приборостроение 2015: материалы 8-й Международной научно-технической конференции, Минск, 19–21 ноября 2015 г.: / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск: БНТУ, 2015 – Т.2. – С. 142–144.

19. Луговой, В.П. Сравнительные исследования производительности прошивания отверстий в хрупких материалах с использованием кольцевых концентраторов / В.П. Луговой, И.В. Луговой // Перспективы развития науки и образования: материалы VIII Международной научно-практической конференции, г. Душанбе, 3–4 ноября 2016: в 2 ч. / Таджикский технический университет. – Душанбе, 2016. – Ч. 2. – С. 91–95.

#### **Тезисы докладов**

20. Щербина, С.А. Прогнозирование шероховатости поверхности при шлифовании ювелирных камней / С.А. Щербина, И.В. Луговой, В.П. Луговой // Новые направления развития приборостроения: тез. докл. 2-й Международной студенческой научно-технической конференции, Минск, 24–29 апреля 2009 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2009. – С. 161.

21. Луговой В.П. Повышение эффективности процесса обработки отверстий малого диаметра путем использования дополнительных видов энергии / И.В. Луговой // Новые направления развития приборостроения: тез. докл. 4-й Международной студенческой научно-технической конференции, Минск, 20–22 апреля 2011 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2011. – С. 150.

22. Федосеенко, С.А. Использование акустомеханического модулирования для введения модулированных колебаний в инструмент / С.А. Федосеенко, И.В. Луговой // Новые направления развития приборостроения: тез. докл. 5-й Международной студенческой научно-технической конференции: Минск, 21–23 ноября / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2012. – С. 135.

23. Луговой, И.В. Методика определения амплитудно-частотных характеристик промежуточных упругих концентраторов в технологических системах для прошивки отверстий / И.В. Луговой, В.Т. Минченя // Новые направления развития приборостроения: тез. докл. 6-й Международной студенческой научно-технической конференции: Минск, 24–26 апреля 2013 г. / Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2013. – С. 108.

24. Луговой, И.В. Ультразвуковое прошивание отверстий в хрупких материалах с использованием кольцевых концентраторов / И.В. Луговой // Новые направления развития приборостроения: тез. докл. 8-й Международной студенческой научно-технической конференции, Минск, 25–27 ноября 2015 г./ Белорусский национальный технический университет; редкол.: О.К. Гусев [и др.]. – Минск, 2015. – С. 118.

#### **Патенты**

25. Ультразвуковой инструмент для обработки отверстий: патент Респ. Беларусь № 8169: МПК В24 В1/04 / И.В. Луговой, В.Т. Минченя, В.П. Луговой; № u20110701; заявл. 16.09.2011; опубл. 30.04.2012 // Бюллетень № 2. – С.217.

26. Устройство для модуляции колебаний акустической системы: патент Респ. Беларусь № 8458: МПК В 26 В1/20 / И. В. Луговой, В. Т. Минченя, В. П. Луговой; № u20120038; заявл. 16.01.2012; опубл. 30.08.2012 // Бюллетень № 32.

27. Устройство для ультразвуковой обработки: патент Респ. Беларусь № 8459, МПК В 06 В3/00 / И.В. Луговой, В.Т. Минченя, В.П. Луговой; № u20120039; заявл. 16.01.2012; опубл. 30.08.2012 // Бюллетень № 30.

28. Устройство для ультразвуковой обработки детали: патент Респ. Беларусь №19108, МПК В 06В 1/00 / И.В. Луговой, В.Т. Минченя, В.П. Луговой; № a20120030; заявл 10.01.2012; опубл. 30.04.2015 // Бюллетень № 2.

29. Ультразвуковой инструмент для обработки или измерения детали: патент Респ. Беларусь № 19219, МПК В 06В 1/00 / И.В. Луговой, В.Т. Минченя., В.П. Луговой; № a20120353; заявл 12.03.2012; опубл. 30.06.2015 // Бюллетень № 3. – С. 65.

## РЭЗІЮМЕ

Лугавы Ігар Вячаслававіч

Распрацоўка колцавых канцэнтратараў зменнай калянасті для  
ўльтрагукавага прашывання адтулін у крахкіх матэрыялах

**Ключавыя словы:** ўльтрагук, прашыванне адтулін, калцавы канцэнтратар, крахкі матэрыял.

**Мэта працы:** распрацоўка калцавых канцэнтратараў з зменнай калянасцю для ультрагукавага прошивання адтулін, якія забяспечваюць павышэнне прадукцыйнасці.

**Метады даследавання і абсталяванне.** Тэарэтычная частка работы выканан на аснове выкарыстання фундаментальных палажэнняў тэорыі ваганняў, тэарэтычнай механікі, тэорыі рэзання, механікі разбурэння крахкіх целаў, тэорыі трэння і зносу. Лікавыя даследаванні выконваліся з выкарыстаннем сучасных прыкладных праграм і сродкаў вылічальнай тэхнікі. Пры выкананні эксперыментальных даследаванняў выкарыстоўваліся прамысловае абсталяванне і абсталяванне для прашывуці адтулін у крахкіх матэрыялах. Пры правядзенні асобных эксперыментаў ужываліся спецыяльна распрацаваныя прылады і абсталяванне.

**Атрыманыя вынікі і іх навізна.** Распрацаваны і даследаваны матэматычныя і фізічныя мадэлі асноўных працэсаў, якія праходзяць пры ўльтрагукавай апрацоўцы адтулін малога дыяметра. Распрацаваны метадыкі правядзення эксперыментальных даследаванняў. Праведзены параўнальныя эксперыментальныя даследаванні працэсу ўльтрагукавага прошивання адтулін традыцыйным спосабам і з ужываннем колцавых канцэнтратараў, па выніках якіх устаноўлены рацыянальныя значэння акустычных і тэхналагічных параметраў рэжыму апрацоўкі, якія забяспечваюць найбольш высокую прадукцыйнасць. Распрацавана канструкцыя акустычнай сістэмы і ўстаноўка для ўльтрагукавага прошивання адтулін у крахкі матэрыялах.

**Ступень выкарыстання:** вынікі працы выкарыстаны для акустычных сістэм тэхналагічнага прызначэння і іх вытворчасць на УП «Навукова-тэхнічны парк БНТУ «Палітэхнік».

**Вобласць прымянення:** ювелірная прамысловасць, оптыка і медыцына, прыборабудаванне.

## РЕЗЮМЕ

Луговой Игорь Вячеславович

Разработка кольцевых концентраторов с переменной жесткостью для ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах

**Ключевые слова:** ультразвук, прошивание отверстий, кольцевой концентратор, хрупкий материал.

**Цель работы:** Цель работы – разработка кольцевых концентраторов с переменной жесткостью для ультразвукового прошивания отверстий, обеспечивающих повышение производительности.

**Методы исследования и оборудование.** Теоретическая часть работы выполнена на основе использования фундаментальных положений теории колебаний, теоретической механики, теорий резания, механики разрушения хрупких тел, теории трения и изнашивания. Численные исследования выполнялись с использованием современных прикладных программ и средств вычислительной техники. При выполнении экспериментальных исследований использовались промышленное оборудование и оснастка для прошивки отверстий в хрупких материалах. При проведении отдельных экспериментов применялись специально разработанные устройства и оснастка.

**Полученные результаты и их новизна.** Разработаны и исследованы математические и физические модели основных процессов, протекающих при ультразвуковой обработке отверстий малого диаметра. Разработаны методики проведения экспериментальных исследований. Проведены сравнительные экспериментальные исследования процесса ультразвукового прошивания отверстий традиционным способом и с применением кольцевых концентраторов, по результатам которых установлены рациональные значения акустических и технологических параметров режима обработки, обеспечивающих наиболее высокую производительность. Разработана конструкция акустической системы и установка для ультразвукового прошивания отверстий в хрупких материалах.

**Степень использования:** результаты работы использованы для акустических систем технологического назначения и их производство на УП «Научно-технический парк БНТУ «Политехник».

**Область применения:** ювелирная промышленность, оптика и медицина, приборостроение.

Igor Luhavy  
Development of ring hubs variable stiffness for ultrasonic sewing holes  
in brittle materials

**Key words:** ultrasound, broaching, circular hub, a fragile material.

**Aim of the work:** theoretical and technological support performance firmware holes in brittle materials by reporting tool internally combined ultrasonic vibrations.

**Objective:** the Aim of this work is the development of circular hubs with variable stiffness for ultrasonic suture the holes, providing increase of productivity.

**Research methods and equipment.** The theoretical part of the work is made on the basis of fundamental provisions of the theory of oscillations, theoretical mechanics, theory of cutting, mechanics of fracture of brittle solids, theory of friction and wear. Numerical studies were performed with the use of modern applications and computers. When performing experimental studies used industrial equipment and tooling for firmware holes in brittle materials. When conducting separate experiments used specially designed devices and equipment.

**The obtained results and their novelty.** Developed and researched mathematical and physical models the basic processes occurring during ultrasonic machining of small diameter holes. The developed technique of experimental studies. Comparative experimental research of process of ultrasonic suture the holes in the traditional way and with the use of the annular hub, the results of which established the rational values of the acoustic and technological parameters of processing mode, which provides the highest performance. The developed design of the speaker system and device for ultrasonic suture the holes in brittle materials.

**Utilization:** the results used for acoustic systems for technological purposes and their production unitary enterprise "Scientific-technological Park BNTU "Polytechnic".

**Application field:** jewelry industry, optics and medicine, instrument.