

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК621.778.04:621.9.047.7

**Дай Вэньци**

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ-  
ВОЛНОВОДОВ ТРУБЧАТОГО ТИПА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРОВЕНОСНЫЕ СОСУДЫ С ЗАДАННЫМИ  
ПАРАМЕТРАМИ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА РАБОЧИХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Минск, 2023

Научная работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный  
руководитель

**АЛЕКСЕЕВ Юрий Геннадьевич**  
кандидат технических наук, доцент, генеральный директор ООО «Инновационный международный центр научно-образовательного и коммерческого сотрудничества «Дело»

Официальные  
оппоненты:

**ТОМИЛО Вячеслав Анатольевич**  
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой «Машины и технология обработки металлов давлением им. С. И. Губкина» Белорусского национального технического университета;

**КОМАРОВ Александр Иванович**  
кандидат технических наук, заведующий лабораторией технологий модифицирования конструкционных материалов НТЦ «Технологии машиностроения и технологическое оборудование» Государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Оппонирующая  
организация

Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

Защита состоится 12 января 2024 г. в 14<sup>00</sup> на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря +375 17 331 30 58; e-mail: scvdmed@bntu.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан «08» декабря 2023 г.

Ученый секретарь  
совета по защите диссертаций,  
доктор технических наук, профессор



О. Г. Девойно

© Дай Вэньци, 2023  
© Белорусский национальный  
технический университет, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка и создание изделий медицинского назначения для лечения сердечно-сосудистых заболеваний, которые являются основными причинами смертности не только в Беларуси, но и во всем мире постоянно является актуальной. Ежегодно от сердечно-сосудистых заболеваний умирает около 20 миллионов человек, что составляет 31 % всех случаев смерти в мире. Для восстановления кровоснабжения обычно используется медикаментозная коррекция, которая в случае далеко зашедшего процесса тромбообразования не дает клинически ощутимого эффекта, а также интервенционные и хирургические методы, характеризующиеся большим операционным травматизмом, значительным количеством ранних послеоперационных осложнений и высокой стоимостью лечения.

В качестве альтернативы для восстановления кровообращения в сосудах предложен метод и оборудование для ультразвуковой ангиопластики, включающие ступенчатые стержневые концентраторы-волноводы. В основе метода лежит внутрисосудистое разрушение тромбообразований низкочастотным высокоинтенсивным ультразвуком. Концентраторы-волноводы являются сложнопрофильными длинномерными малого диаметра с высокой точностью размеров и качеством рабочих поверхностей изделиями.

Несмотря на доказанную эффективность метода лечения с использованием стержневого ступенчатого концентратора-волновода, имеется ряд недостатков, которые ограничивают их более широкое применение в лечебной практике. Установлено, что концентраторы-волноводы стержневого типа могут способствовать акустомеханическому повреждению сосудистой стенки. Белорусскими учеными в настоящее время разработана новая методика терапии сосудистой системы на основе применения конструкции со ступенчатым концентратором-волноводом трубчатого типа. Эффект разрушения тромбов/бляшек осуществляется за счет использования одновременно ультразвукового воздействия и кавитационной струи жидкости, которая формируется путем ее инфузионной подачи через внутреннюю полость концентратора-волновода на его дистальную часть. По оценкам кардиологов потребность в операциях по ультразвуковому разрушению тромбов только в Беларуси составляет около 300 в год.

Конструкция типового ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа отличается от конструкции стержневого концентратора-волновода наличием внутреннего канала – ступенчатых отверстий с диаметрами от 1,0 до 0,5 мм и трех боковых микроотверстий диаметром 0,3 мм в дистальной части. Его длина более 700 мм; ступенчатая наружная поверхность с диаметрами от 1,5 до 1,0 мм, качество точности h7; сферический наконечник с наружным диаметром 1,35 мм, качество точности k7; параметр шероховатости наружных поверхностей  $Ra = 0,1$  мкм. В качестве материала для изготовления концентратора-волновода из соображений высокой прочности и биосовместимости необходимо использовать стали и сплавы, рекомендованные к применению при изготовлении изделий медицинского назначения. К таким материалам относятся коррозионностойкая аустенитная сталь 12X18H9 и ее аналоги, а также титан и его сплавы.

Для формообразования поверхностей и формирования требуемых свойств у ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа технология, применяемая

для изготовления стержневого концентратора-волновода, не может быть использована ввиду необходимости формирования внутреннего канала – осевого отверстия и боковых микроотверстий в дистальной части. Существующие процессы получения длинномерных изделий малого диаметра, основанные только на пластических методах либо механической обработке и физико-технических методах, имеют ряд недостатков, не позволяющих изготавливать ступенчатые концентраторы-волноводы трубчатого типа с заданными параметрами точности и качества рабочих поверхностей. Учитывая невозможность изготовления ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа на основе разработки какой-то одной базовой технологии, вполне обоснованной будет необходима разработка комбинированной технологии, основанной на сочетании методов как механической, так физико-технической и химической обработки.

Расчетные и экспериментальные данные, результаты компьютерного моделирования, необходимые для создания такой комбинированной технологии практически отсутствуют либо носят противоречивый характер, что существенно сдерживает изготовление ступенчатых концентраторов-волноводов трубчатого типа, крайне востребованных медицинскими учреждениями Республики Беларусь. С учетом вышесказанного, в данной диссертационной работе представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, компьютерного моделирования, на основе которых создана комбинированная технология изготовления ступенчатых концентраторов-волноводов трубчатого типа, включающая процессы безоправочного волочения, раздачи и обжима с электролитно-плазменной и химической обработкой для обеспечения строгих требований по качеству поверхностей и точности размеров, которым должны отвечать изделия медицинского назначения.

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

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

Диссертационное исследование соответствует приоритетному направлению научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. (Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190) в части п. 8 «Многофункциональные материалы и технологии» и приоритетному направлению научной, научно-технической и инновационной деятельности на 2021–2025 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156) в части п. 2 «Биологические, медицинские, фармацевтические и химические технологии и производства: медицинское оборудование».

Разработанные в рамках диссертационного исследования технологические процессы и опытно-экспериментальное оборудование использовались при выполнении:

– Государственной программы инновационного развития Республики Беларусь по инновационному проекту «Создание и организация деятельности инновационно-производственного центра по выпуску изделий медицинского назначения», № ГР 20180406;

– Государственной программы научных исследований «Фундаментальные и прикладные науки – медицине» по проекту «Разработка и исследование процессов получения волноводно-катетерных систем трубчатого типа переменного сечения для внутрисосудистого ультразвукового воздействия с применением физико-

технических методов и методов пластического деформирования» в рамках задания «Исследование упруго-эластических свойств артерий в условиях внутрисосудистого ультразвукового воздействия с применением волноводно-катетерных систем трубчатого типа переменного сечения при атеросклерозе и сахарном диабете», № ГР 20161031.

### **Цель и задачи исследования**

Целью работы является разработка технологического обеспечения комбинированного формообразования ступенчатых концентраторов-волноводов трубчатого типа (СКВТТ) с заданными параметрами точности и качества рабочих поверхностей для ультразвукового воздействия на кровеносные сосуды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– выполнить расчеты, провести технологические исследования, установить влияние характеристик деформации на силовые параметры процесса, структурные и механические свойства материала при формировании СКВТТ методом безоправочного волочения тонкостенной малого диаметра трубки из стали 12Х18Н9 и определить оптимальные технологические режимы процесса;

– разработать численную модель, выполнить расчеты, провести технологические исследования и установить показатели, характеризующие напряженно-деформированное состояние материала, закономерности изменения размеров и рациональные диапазоны режимов формообразования раздечей и обжимом сферической дистальной части СКВТТ с осевым отверстием;

– провести экспериментальные исследования процесса электрохимической прошивки боковых микроотверстий в тонкостенной сферической дистальной части СКВТТ, определить влияние параметров процесса на форму и размеры микроотверстий и установить их рациональные значения при формировании микроотверстий с заданной микрогеометрией и точностью размеров;

– разработать способ и провести экспериментальные исследования процесса химической очистки от окалины внутреннего канала СКВТТ малого диаметра с целью определения влияния параметров процесса на микрогеометрию, качество и коррозионную стойкость его поверхности и установить их рациональные значения;

– провести экспериментальные исследования процесса электролитно-плазменной обработки наружных поверхностей СКВТТ с целью определения влияния технологических параметров на изменение геометрических размеров и качество поверхности и установить их рациональные значения для достижения заданной точности размеров, получения требуемой микрогеометрии и коррозионной стойкости наружной поверхности СКВТТ;

– разработать технологическое обеспечение комбинированного формообразования СКВТТ с достижением технических требований (точности размеров, формы и качества поверхностей) и с формированием физико-механических свойств, отвечающих условиям эксплуатации изделия при ультразвуковом воздействии на кровеносные сосуды.

### **Объект и предмет исследования**

Объект исследования – ступенчатый концентратор-волновод трубчатого типа для ультразвукового воздействия на стенки кровеносных сосудов.

Предмет исследования – технологическое обеспечение комбинированного формообразования ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа с заданной точностью и качеством рабочих поверхностей для ультразвукового воздействия на стенки кровеносных сосудов.

### **Научная новизна**

1. Установлены количество минимальных переходов с промежуточной термической обработкой и усилие безопрочного волочения тонкостенной малого диаметра трубки в процессе формообразования ступенчатых поверхностей концентратора-волновода, позволяющие достигать требуемой геометрии у изделия с обеспечением заданной точности ее размеров, одновременно управлять механическими характеристиками материала за счет деформационного упрочнения с формированием аксиальной текстуры у материала при отсутствии в процессе волочения потери устойчивости поперечного сечения, обрывности и образования ужимов трубки.

2. Установлены численным моделированием процессов раздачи и обжима тонкостенной малого диаметра трубки при формообразовании сферической дистальной части концентратора-волновода с осевым отверстием показатели, характеризующие напряженно-деформированное состояние материала (напряжение по Мизесу, относительная пластическая деформация) и определяющие закономерности изменения размеров изделия, расчетами обоснованы и экспериментально установлены оптимальные технологические режимы (количество переходов, режим термической обработки между переходами, усилие деформации и коэффициент раздачи) получения изделия заданного профиля без перегрева и разрушения трубки.

3. Установлено влияние температурно-скоростных параметров электрохимической прошивки (диаметр медного электрода, рабочее напряжение, состав, расход, концентрация и температура электролита) на точность размеров и форму боковых микроотверстий в тонкостенной сферической дистальной части концентратора-волновода, определены рациональные технологические режимы, обеспечивающие стабильность процесса и полное удаление продуктов анодного растворения из зоны обработки.

4. Определено влияние температурно-скоростных и временных параметров (расход, температура и время обработки кислотной смесью) на процесс химической очистки поверхности изделия разработанным новым методом путем прокачки кислотной смеси через внутренний малого диаметра канал концентратора-волновода, оптимизирован состав кислотной смеси и установлены рациональные технологические режимы, исключающие загрязнение зоны обработки продуктами растворения и закупоривание внутреннего канала, обеспечивающие качественное удаление окалины, отсутствие очагов питтинговой и межкристаллитной коррозии и повышающие коррозионную стойкость поверхности материала.

5. Экспериментально установлены и обоснованы температурно-временные параметры электролитно-плазменной обработки (рабочее напряжение, состав и температура электролита, время обработки) при очистке и полировании наружных поверхностей концентратора-волновода в солевом электролите без существенного съема материала и определены рациональные параметры процесса, необходимые для полного удаления окалины и повышения коррозионной стойкости с достиже-

нием заданной точности размеров, параметра шероховатости и придания поверхности концентратора-волновода однородного блеска.

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

1. Результаты расчетов и экспериментальных исследований влияния относительного обжатия, коэффициента вытяжки на силовой режим, микроструктуру и упрочнение материала (сталь 12X18T9) при безопрочноном волочении тонкостенной малого диаметра трубки, что позволило обеспечить в рациональном диапазоне усилий волочения за несколько переходов с закалкой между переходами, получение у концентратора-волновода ступенчатых поверхностей с заданным качеством точности размеров, с формированием аксиальной текстуры и деформационным упрочнением материала.

2. Численная компьютерная модель формообразования сферической дистальной части концентратора-волновода с осевым отверстием в процессе раздачи и обжима тонкостенной малого диаметра трубки, учитывающая закономерности изменения показателей напряженно-деформированного состояния материала (напряжения по Мизесу и относительная пластическая деформация), что позволило установить характер изменения размеров (наружный диаметр и толщина стенки трубки) для получения изделия заданного профиля, а также результаты расчетов и экспериментальных исследований, которые позволили обосновать деформационно-силовые режимы, количество переходов и термообработку между переходами при раздаче коническим пуансоном и обжиме сферической матрицей без перегрева и разрушения трубки.

3. Результаты экспериментальных исследований процесса электрохимической прошивки боковых микроотверстий в тонкостенной сферической дистальной части концентратора-волновода, определяющие влияние технологических параметров на точность размеров и форму микроотверстий, на стабильность и интенсивность удаления продуктов анодного растворения из межэлектродного промежутка, что позволило установить рациональные параметры процесса (диаметр медного электрода, рабочее напряжение, расход, концентрацию и температуру электролита), обеспечивающие формирование микроотверстий с требуемой точностью размеров и правильной формы со сглаженными краями без острых кромок.

4. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических режимов на химическую очистку внутренних поверхностей канала концентратора-волновода от окалины новым способом, при котором обработка ведется путем прокочки через канал смеси кислот, что позволило установить рациональные параметры процесса (состав кислотной смеси, расход кислотной смеси, температура и время обработки), обеспечивающие снижение параметра шероховатости, повышение коррозионной стойкости поверхности к физиологическому раствору и получение поверхности, свободной от окалины, коррозии, посторонних покрытий и частиц и имеющей равномерный металлический цвет.

5. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических режимов (температура и рабочее напряжение) на очистку и полирование наружных поверхностей концентратора-волновода в процессе электролитно-плазменной обработки в солевом электролите, что позволило установить оптимальное время обработки при минимальном съеме материала, обеспечивающее одновременно удаление окалины, придание поверхности однородного блеска, повышение коррози-

онной стойкости, необходимый квалитет точности размеров и снижение параметра шероховатости.

### **Личный вклад соискателя**

Результаты, выносимые на защиту, получены автором совместно с научным руководителем соискателя к. т. н., доцентом Алексеевым Ю. Г. Автор участвовал в определении цели и задач, в обсуждении результатов исследований. Научный руководитель оказывал консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения диссертации и в написании статей. Автором лично выполнены: обзор методов формообразования длинномерных тонкостенных трубчатых изделий малого диаметра; числовые расчеты и моделирование основных технологических операций; проведены экспериментальные исследования и изучены особенности формообразования элементов СКВТТ безоправочным волочением, раздачей и обжимом, электрохимической прошивкой, химической очисткой и электролитно-плазменной обработкой.

Автором при участии к. т. н., доцента Королева А. Ю. исследовано влияние электролитно-плазменной обработки в процессе получения заготовки изделия после волочения на качество поверхности. Научный сотрудник Будницкий А. С. принимал участие в совместных с автором разработках конструкторской и технологической документации на опытно-экспериментальное оборудование. Профессор, к. т. н. Минченя В. Т. и профессор, д. м. н. Адзериho И. Э. оказывали консультативную помощь автору в организации проведения ультразвуковых испытаниях СКВТТ в клинике.

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

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на: III Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты – 2015» (г. Минск, 26–27 ноября 2015 г.); научно-технической конференции «25 лет дипломатических отношений между Республикой Беларусь и Китайской Народной Республикой: итоги и перспективы научно-технического сотрудничества» (г. Минск, 3 марта 2017 г.); 3-м Белорусско-Прибалтийском форуме «Сотрудничество – катализатор инновационного роста» (г. Минск, 19–20 октября 2017 г.); IV Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты – 2017» (г. Минск, 2–3 ноября 2017 г.); 33-й международной научно-практической конференции «Технология – Оборудование – Инструмент – Качество» (г. Минск, 11 апреля 2018 г.); международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (г. Могилев, 26–27 апреля 2018 г.); 4-м Белорусско-Прибалтийском форуме «Сотрудничество – катализатор инновационного роста» (г. Минск, 31 мая – 1 июня 2018 г.); V Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты – 2018» (г. Минск, 15–16 ноября 2018 г.); VIII форуме вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства (г. Минск, 29 октября – 01 ноября 2019 г.); VI Белорусско-Китайском молодежном инновационном форуме «Новые горизонты – 2019», (г. Минск, 12–13 ноября 2019 г.).

Разработанные в рамках диссертационного исследования с участием аспиранта технологические процессы и опытно-экспериментальное оборудование: приспособление для формирования переходов трубчатых волноводов; приспособление для правки трубчатых волноводов; приспособление для формирования наконечника труб-



чатых волноводов; установка для прошивания отверстий в трубчатых волноводах использовались при выполнении инновационных проектов, заданий по научно-исследовательским работам и внедрены на Государственном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» при изготовлении СКВТТ для внутреннего ультразвукового воздействия на кровеносные сосуды в соответствии с разработанной с участием аспиранта конструкторской и технологической документации: акустическая система, технологический процесс получения детали «Трубчатый волновод».

По настоящее время Государственным предприятием «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» с применением разработанного оборудования и технологических процессов изготовлено и поставлено в клиники РБ более 30 единиц ультразвуковых СКВТТ, которые прошли санитарно-гигиенические и технические испытания и успешную апробацию в учреждениях здравоохранения Республики Беларусь.

#### **Опубликованность результатов диссертации**

По результатам исследований опубликовано 6 печатных работ, в том числе 3 статьи в изданиях, включенных в перечень ВАК (2,5 авторских листа), 3 статьи и тезиса докладов в сборниках материалов международных конференций.

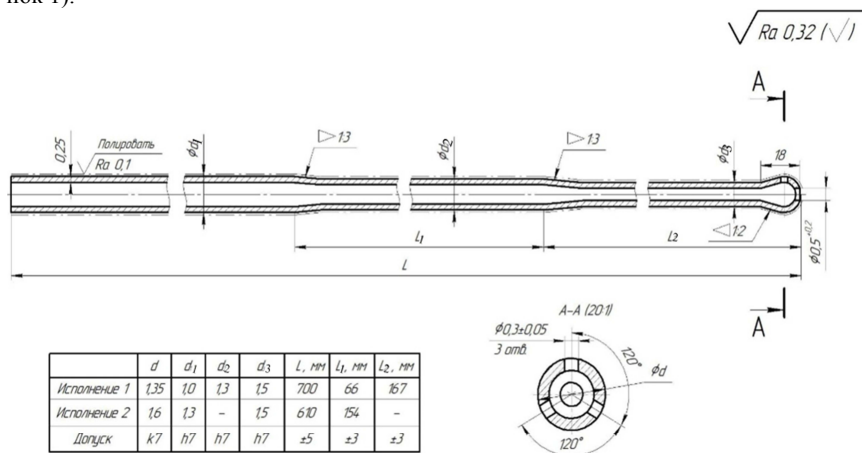
#### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из перечня сокращений и обозначений, введения, общей характеристики работы, 4 глав основного текста, заключения, списка использованных источников и 3 приложений. Работа содержит 197 страниц, в том числе 147 страниц машинописного текста, 19 таблиц и 110 иллюстраций, 9 страниц библиографического списка из 108 источников. Приложения, включающие конструкторско-технологические документы и справку о внедрении полученных результатов занимают 41 страницу.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В первой главе Проведен обзор отечественных и зарубежных патентных и литературных источников, включая электронные ресурсы, связанные с возможными способами формообразования рабочих поверхностей сложнопрофильных длинномерных малого диаметра конструкций: холодного деформирования, магнитно-абразивной обработки, сварочных и родственных процессов, обработки в электролитах, методы механического сверления, гидроабразивной, лазерной, электроэрозийной и электрохимической прошивки отверстий. Описаны их недостатки и преимущества в достижении требуемых технических характеристик, установленных нормативными документами на СКВТТ.

Рассмотрены типовая конструкция и материал для изготовления СКВТТ (рисунок 1).



**Рисунок 1 – Типовая конструкция СКВТТ (материал – 12X18H9)**

В соответствии с ТУ ВУ 100232486.049–2017 на систему акустическую для эндоскопической абляции предусмотрено изготовление СКВТТ из стали 12X18H9 ГОСТ 9941–81. Основные размеры типового СКВТТ: длина до 700 мм; ступенчатая наружная поверхность с диаметрами: от 1,5 до 1,0 мм качество точности h7; диаметр внутренней полости – от 0,5 до 1,0 мм; сферический наконечник с наружным диаметром 1,35 мм качество точности k7, центральным отверстием  $0,5^{+0,2}$  мм и тремя боковыми отверстиями диаметром  $0,3 \pm 0,05$  мм; параметр шероховатости наружных поверхностей  $Ra = 0,1$  мкм, внутренних поверхностей  $Ra = 0,32$  мкм. На поверхности СКВТТ не должно быть трещин, раковин, забоин, царапин, выкрошенных мест, заусенцев, расслоений и других загрязнений (окалин, материалов шлифовки, полировки и следов смазки). Материал СКВТТ должен иметь предел прочности не менее 600 МПа.

В главе сформулированы цели и задачи теоретических и экспериментальных исследований диссертационной работы, направленные на разработку технологического обеспечения комбинированного формообразования СКВТТ, включающего:

– безоправочное волочение для получения трубчатого ступенчатого элемента СКВТТ. Для повышения усталостной прочности при изготовлении волочением, рекомендуется проводить термообработку поверхности трубки между переходами с последующим нанесением смазочного материала;

– раздачу пуансоном и обжим матрицей для формирования сферического наконечника дистальной части СКВТТ. При этом осевое перемещение матрицы необходимо реализовать так, чтобы в сферическом наконечнике оставалось центральное отверстие;

– электрохимическую прошивку для получения боковых микроотверстий диаметром в рабочем наконечнике дистальной части СКВТТ;

– химическую очистку с целью обеспечения качественных внутренних поверхностей СКВТТ с удалением окислов;

– электролитно-плазменную обработку с целью удаления заусенцев, скругления острых кромок, обеспечения точности размеров и качества наружных поверхностей СКВТТ.

**Во второй главе** представлено обоснование и расчеты по выбору методов исследования и описание разработанного экспериментального как исследовательского, так и технологического оборудования для всех стадий формообразования рабочих поверхностей СКВТТ.

Выполнены предварительные расчеты для экспериментальных исследований процессов формообразования безоправочным волочением трубчатого ступенчатого элемента СКВТТ из исходной трубки диаметром  $D = 1,5$  мм и с толщиной стенки  $s = 0,25$  мм. Спроектировано оборудование для волочения (с усилием волочения до  $Q = 200$  Н) и деформирующий инструмент – твердосплавные волокна из сплава ВК-8, имеющего высокую твердость и износостойкость (рисунок 2, а). Между переходами необходимо проводить термическую обработку с целью повышения пластичности материала. Для правки трубчатого элемента спроектировано и изготовлено устройство (рисунок 2, б), совмещающее в себе особенности как роликовой, так и фильерной правки: протяжку между тремя правильными роликами с вращением изделия вокруг своей оси.

Выполненные расчеты позволили для экспериментальных исследований процессов раздачи и обжима заготовки разработать и изготовить специальную оснастку с использованием инструмента из быстрорежущей стали Р6М5 в виде игольчатых пуансонов для раздачи и матрицы для обжима.

Создана экспериментальная установка для исследования процессов получения боковых микроотверстий в сферическом наконечнике СКВТТ с возможностью перемещения электрода-инструмента по трем координатам с помощью метрических винтов (рисунок 2, в). В установку входит гидравлическая система, обеспечивающая подачу электролита в зону обработки; система крепления с возможностью быстрой замены проволочного электрода диаметром менее  $D_0 = 0,1$  мм; источник питания с возможностью регулировки рабочего напряжения в диапазоне  $U$  от 0 до 20 В с силой тока  $I$  от 0 до 8 А.

Для очистки внутренней поверхности СКВТТ от окислов предложен способ, при котором смесь кислот подавалась во внутреннюю полость трубчатых заготовок с помощью дозирующего шприцевого насоса Perfusor Compact S (рисунок 2, г).

Выбран базовый кислотный раствор. Оборудование обеспечивает скорость подачи раствора в диапазоне от 0,4 мл/мин до 1,0 мл/мин.

Исследование процесса полирования наружных поверхностей СКВТТ проводили на специально разработанной и изготовленной экспериментальной установке (рисунок 2, д) для электролитно-плазменной обработки в солевом растворе сульфата аммония при напряжении 300 В. Плотность тока при этом составляет 0,1–0,15 А/см<sup>2</sup>.

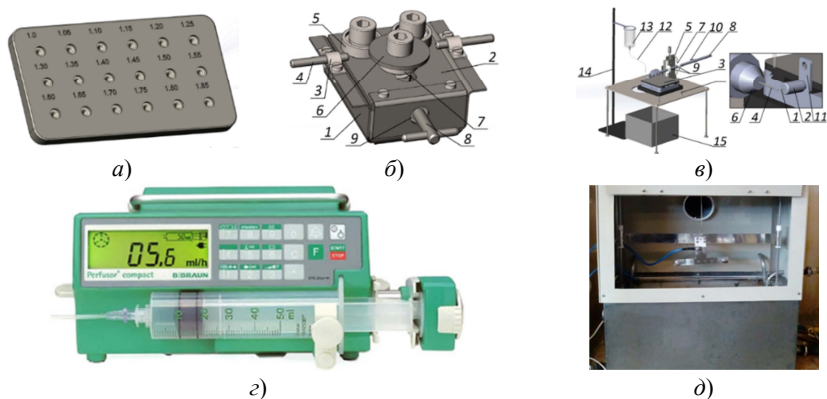


Рисунок 2 – Экспериментальное оборудование для всех стадий изготовления СКВТТ

**Третья глава** посвящена экспериментальным исследованиям и теоретическим разработкам процесса получения СКВТТ. По результатам расчетов и исследований безоправочного волочения установлено, что необходимо выполнять волочение с величиной относительного обжатия за один проход не более  $\varepsilon = 0,15$ . Величина вытяжки за один проход допустима в диапазоне  $\mu = 1,1–1,5$ . Разработан маршрут волочения тонкостенной (0,25 мм) трубки малого диаметра (1,5 мм) для получения с требуемым качеством поверхности без изменения толщины стенки ступеней СКВТТ с диаметрами  $D = 1,3$  мм и  $D = 1,0$  мм, включающий пять проходов. В разработанном маршруте вытяжка за проход составляет  $\mu = 1,09–1,13$ , а относительное обжатие  $\varepsilon = 0,08–0,12$ . Нормальный процесс волочения обеспечивается при коэффициенте запаса прочности, который составляет не более чем  $k_{зан} = 1,1–1,2$  (таблица 1). Между проходами выполнялась закалка в воду с температуры 1150 °С. С повышением относительного обжатия с  $\varepsilon = 0,08$  до  $\varepsilon = 0,21$  происходит постепенное повышение усилия волочения в 1,5 раза.

Одновременно в процессе волочения происходит упрочнением материала. При этом микроструктура в исходном образце (равноосный аустенит с размерами зерна 10–15 мкм) после волочения с относительным обжатием  $\varepsilon = 0,08–0,12$  имеет текстуру с размерами зерен в продольном направлении 5–9 мкм и в поперечном 4–6 мкм, а при относительном обжатии  $\varepsilon = 0,17–0,21$  размеры зерен составляют: в продольном направлении 8–11 мкм, в поперечном 2,5–4,8 мкм. Происходит деформационное упрочнение материала до 1,35 раза в процессе волочения вследствие поворота плоскостей скольжения и увеличения искажений кристаллической решетки (исходный

предел прочности в закаленном состоянии материала составляет  $\sigma_b = 590$  МПа, в результате волочения среднее значение предела прочности материала  $\sigma_b = 800$  МПа).

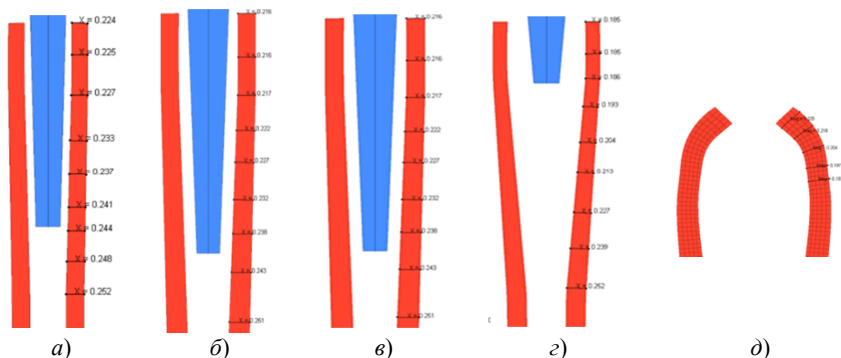
Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований процесса волочения

№ обр.	Исх. диаметр $D_n$ , мм	Конеч. диаметр $D_k$ , мм	Отн. обжатие $\epsilon$	Коэффициент вытяжки $\mu$	Микротвердость $HV_{0,2}$ , МПа	Усилие волочения $Q$ , Н		$k_{зап}$
						Расч.	Эксп.	
1	1,5	1,5	0,00	0,00	234	–	–	
2	1,5	1,4	0,08	1,09	292	156	167	1,7
3	1,4	1,3	0,09	1,10	300	156	177	1,6
4	1,4	1,2	0,17	1,21	350	312	275	1,1
5	1,3	1,1	0,19	1,24	347	311	373	1,0
6	1,2	1,0	0,21	1,27	337	310	245	1,0
7	1,3	1,2	0,10	1,11	319	156	216	1,5
8	1,2	1,1	0,11	1,12	304	156	139	1,3
9	1,1	1,0	0,12	1,13	296	156	162	1,2

Определены следующие оптимальные технологические режимы формообразования ступенчатых поверхностей СКВТТ: 5 проходов с шагом 0,1 мм, усилие от 160 Н до 210 Н с промежуточной термообработкой (закалка в воду с температуры 1150 °С).

Для формирования сферического рабочего наконечника диаметром 1,35 мм с осевым отверстием диаметром 0,5 мм из трубки диаметром 1,0 мм требуется: предварительная раздача заготовки до диаметра 1,37–1,38 мм (с учетом припуска под последующие операции финишной обработки) с последующим обжимом дистальной части.

На основе метода конечных элементов в среде программного комплекса ABAQUS выполнено моделирование операций раздачи трубной заготовки коническим пуансоном и обжима сферической матрицей, позволяющее оценить напряженно-деформированное состояние дистального участка трубки, силовые параметры процесса, изменение толщины стенки в процессе формоизменения и рассчитать длину трубки для оформления сферического наконечника с осевым отверстием СКВТТ (рисунок 3).



*a* – первый этап раздачи; *б* – второй этап раздачи; *в* – третий этап раздачи; *г* – четвертый этап раздачи; *д* – расчетная схема моделирования процесса обжима дистальной части

**Рисунок 3 – Пример численного моделирования процесса раздачи и обжима дистальной части СКВТТ**

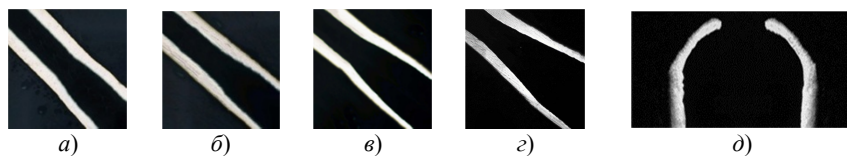
Максимальные напряжения лежат в пределах 500–550 МПа, остаточные напряжения на внутренней стороне кромок дистальной части достигают 430–440 МПа, что требуется учитывать при выборе исходных свойств материала трубной заготовки (таблица 2).

Таблица 2 – Основные параметры процесса формообразования наконечника на трубчатой заготовке на различных этапах деформации

Этап	Нач. длина $L_n$ , мм	Кон. длина $L_k$ , мм	Изменение длины $\Delta L$ , мм	Толщина стенки на наружной кромке $s_k$ , мм	Макс. усилие раздачи/обжима $Q_{\max}$ , Н	Макс. исх. диаметр $D_n$ , мм	Макс. кон. диаметр $D_k$ , мм	Макс. относ. пластическая деформация $\epsilon_{\max}$	Макс. напряжение по Мизесу $\sigma_{\max}$ , МПа
1	8	7,872	0,128	0,224	35,8	1	1,13	0,28	527
2	7,872	7,830	0,052	0,216	40,3	1,13	1,15	0,12	411
3	7,830	7,676	0,154	0,198	78,2	1,15	1,27	0,24	513
4	7,676	7,506	0,170	0,185	98,4	1,27	1,38	0,21	503
5*	7,506	6,496	1,010	0,229	311,5	1,38	0,84*	0,76	585

Примечание: 5\* – этап формирования дистальной части заготовки СКВТТ.

Проведены экспериментальные исследования процесса раздачи и обжима, иллюстрация которых представлена на рисунке 4 и в таблице 3.



*a* – первый этап раздачи; *б* – второй этап раздачи; *в* – третий этап раздачи; *г* – четвертый этап раздачи; *д* – обжим дистальной части

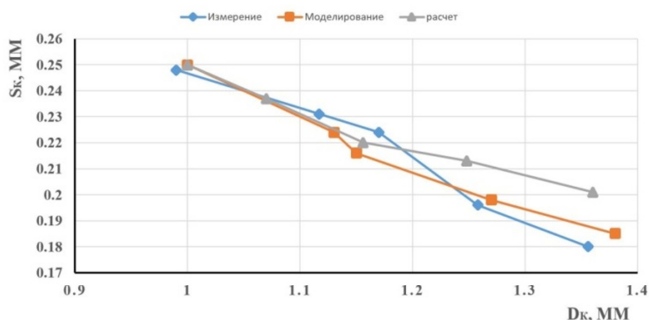
Рисунок 4 – Продольные и поперечные сечения трубки после процесса раздачи и обжима дистальной части СКВТТ

Таблица 3 – Результаты измерений профиля продольного сечения образцов

Переход	Внутренний диаметр (диаметр пуансона) $d_n$ , мм	Толщина стенки $s_k$ , мм	Наружный диаметр $D_k$ , мм	Коэффициент раздачи $K_p$
Исх.	0,494	0,248	0,990	–
1	0,655	0,231	1,117	1,13
2	0,722	0,224	1,170	1,08
3	0,866	0,196	1,258	1,08
4	0,996	0,180	1,356	1,09

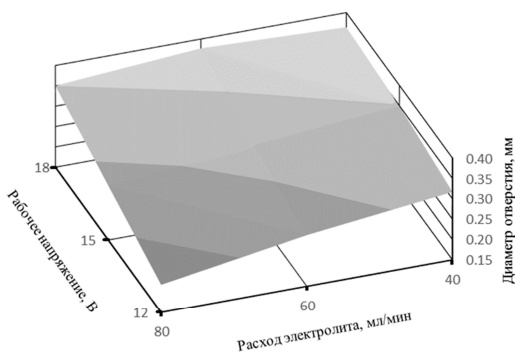
Таким образом, установлены параметры режимов формообразования рабочего наконечника в сферической дистальной части СКВТТ методом раздачи и обжима, обеспечивающие формирование требуемой геометрии и высокие прочностные характеристики. Полученные результаты предварительного расчета, численного моделирования и экспериментальных исследований процессов формообразования наконечника СКВТТ раздачей и обжимом имеют схожие значения, что подтвер-

ждает корректность использования как метода предварительного расчета, так и численного моделирования (рисунок 5). Установлено, что коэффициент раздачи не вышел за пределы допустимого значения и для всех переходов лежит в пределах  $K_p = 1,11 \div 1,12$ . Процесс формообразования включает четыре перехода раздачи коническим пуансоном с усилием деформации  $Q = 36 \div 98$  Н и один переход с усилием деформации  $Q = 312$  Н при обжиме сферической матрицей.



**Рисунок 5 – Зависимости изменения толщины стенки заготовки от ее наружного диаметра в процессе раздачи, полученные в результате расчета, численного моделирования и экспериментальных исследований**

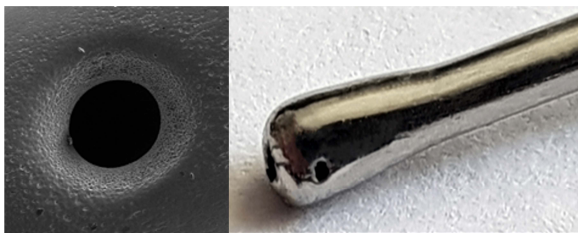
Влияние характеристик процесса электрохимической прошивки на диаметр формируемого микроотверстия представлено на трехмерном графике (рисунок 6). Увеличение рабочего напряжения с 12 В до 18 В приводит к увеличению диаметра прошитого отверстия. При значениях напряжения 12 В происходит заметное уменьшение кратера отверстия. Однако при этом значении напряжения снижается производительность процесса и повышается вероятность замыкания из-за малой величины межэлектродного промежутка. Увеличение рабочего напряжения до 18 В существенно повышает производительность обработки, но диаметр прошитого отверстия больше номинального значения на 30–40 %.



**Рисунок 6 – Зависимость диаметра прошиваемого отверстия от рабочего напряжения при различных значениях расхода электролита**

С увеличением расхода электролита через межэлектродный промежуток уменьшается размер формируемого отверстия. Это связано с изменением проводимости электролита в зависимости от содержания в межэлектродном промежутке продуктов растворения. Недостаточная скорость потока электролита не обеспечивает своевременного и необходимого удаления продуктов анодного растворения и водорода, выделяющегося на катоде, и как следствие, увеличивается сопротивление в межэлектродном зазоре и снижается плотность тока. И при расходе электролита ниже 40 мл/мин происходили частые замыкания. Расход электролита (выше 60 мл/мин) приводит к нарушению стабильности процесса прошивки, что выразилось в подгорании электрода-инструмента, что объясняется возникновением кавитационных явлений при обработке нежестким электродом диаметром 0,07 мм.

Установлены технологические режимы, обеспечивающие высокую стабильность процесса и полное удаление продуктов анодного растворения, и позволяющие выполнять прошивку отверстий диаметром 0,3 мм с требуемой точностью размера, правильной формы: диаметр электрода  $D_{эл.} = 0,07$  мм, напряжение  $U = 15$  В, электролит – натрий азотнокислый  $\text{NaNO}_3$  25 %, расход электролита  $V = 60$  мл/мин (рисунок 7).



**Рисунок 7 – Внешний вид боковых микроотверстий и прилегающей поверхности**

Для очистки внутренней поверхности (диаметром от 0,5 до 1,0 мм) от окалины использовался раствор кислот и их же смесь без добавления воды:  $\text{H}_3\text{PO}_4$  – 78 %,  $\text{HNO}_3$  – 11 %,  $\text{HCl}$  – 11 %. На первом этапе обработка выполнялась при температуре раствора 25 °С, скорость прокачки жидкости составляла 0,40 и 1,00 мл/мин. Продолжительность обработки – 10 мин. Состояние очищаемой поверхности в результате обработки на рекомендованных из литературных источников режимах раствором кислот не изменилось.

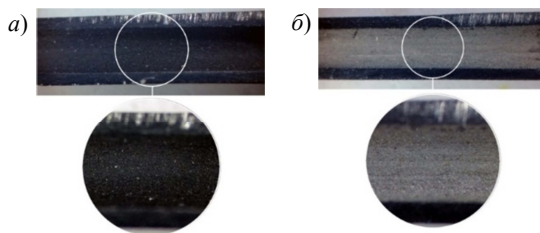
Наиболее качественная очистка от окалины достигается кислотной смесью при меньшей скорости прокачки, когда обеспечиваются необходимые условия для растворения. При более высокой скорости прокачки смеси качество очистки значительно снижается из-за интенсивной точечной коррозии – образования питтингов в местах различных дефектов, сформированных на поверхности после волочения (трещин от внутренних напряжений, выхода на поверхность границ зерен, дислокаций и т. п.). Также происходит загрязнение зоны обработки продуктами растворения и закупоривание внутреннего канала.

Повышение температуры смеси до 50 °С вызывает чрезмерное растравливание поверхности с формированием очагов межкристаллитной коррозии. Лучшее качество очистки с минимальным количеством очагов коррозии достигается при скоро-



сти прокачки раствора 1,00 мл/мин. При этом качество очистки от окалины заметно ниже, чем при обработке с применением раствора с температурой 25 °С.

Таким образом, оптимизирован состав кислотной среды; определены температурно-скоростные и временные параметры процесса. Установлено, что наиболее качественное удаление окалины без формирования очагов коррозии обеспечивается при обработке с применением смеси кислот (ортофосфорной  $H_3PO_4$  – 78 %, азотной  $HNO_3$  – 11 %, соляной  $HCl$  – 11 %) с температурой  $T = 25$  °С при расходе смеси кислот  $V = 0,4$  мл/мин и продолжительности обработки  $t = 10$  мин, с обеспечением параметра шероховатости  $Ra = 0,32$  мкм.



**Рисунок 8 – Внутренняя поверхность исходного образца (а), после обработки с применением смеси кислот (б)**

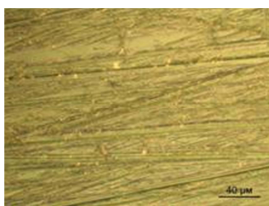
По результатам исследований процесса полирования и очистки наружных поверхностей СКВТТ установлено, что электролитно-плазменная обработка в 4 %-растворе сульфата аммония  $(NH_4)_2SO_4$  при напряжении  $U = 300$  В и температуре электролита  $T = 90$  °С приводит к существенному повышению качества поверхности (таблица 4). Однако при этом наблюдаются локальные остатки точечных очагов окалины, которые полностью удаляются только после обработки продолжительностью 210 секунд.

**Таблица 4 – Результаты измерения диаметра и шероховатости поверхности образцов после ЭПО**

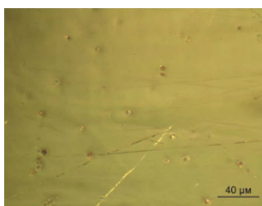
№ образца	Время обработки, $t$ , с	Измеренный диаметр, $D$ , мм	Шероховатость поверхности $Ra$ , мкм
Исходный	–	1,69	0,288
1	30	1,68	0,288
2	60	1,68	0,218
3	90	1,68	0,196
4	120	1,68	0,179
5	150	1,68	0,201
6	180	1,68	0,140
7	210	1,67	0,168
8	240	1,67	0,125
9	270	1,67	0,101
10	300	1,66	0,085

Требуемая точность размеров по 7 качеству и снижение параметра шероховатости до  $Ra = 0,1$  мкм достигнуты без существенного съема металла (0,01 мм на сторону) при времени обработки 240 с.

Также ЭПО придает требуемый эстетичный вид поверхности изделия. Данный параметр оценивался измерением блеска поверхности. На исходном без ЭПО с  $Ra = 0,32$  мкм блеск  $\theta = 2,4$  %, а для образца после ЭПО продолжительностью 240 секунд с  $Ra = 0,1$  мкм блеск  $\theta = 62$  % (рисунок 9).



а) – исходный  
 $Ra = 0,325 \pm 0,055$  мкм;  $\theta = 2,4$  %



б) – ЭПО 240 секунд  $Ra = 0,102 \pm 0,031$  мкм;  
 $\theta = 62,0$  %

**Рисунок 9 – Структура поверхности образца исходного и после ЭПО**

В работе проведены исследования, направленные на определение влияние процессов финишной обработки на коррозионную стойкость поверхностей. Коррозионным испытаниям подвергались образцы предварительно закаленные при температуре 1150 °С с последующей обработкой: шлифованием; химической очисткой (продолжительность 5 и 10 минут); электролитно-плазменной обработкой в течение 240 секунд.

Полученные результаты сравнительных испытаний (таблица 5) свидетельствуют о достаточно высокой коррозионной стойкости поверхности, сформированной в результате химической очистки продолжительностью 10 мин и электролитно-плазменной обработки продолжительностью 240 секунд. Таким образом, поверхности, сформированные на внутренней стороне трубчатого волновода в процессе химической очистки продолжительностью 10 мин и на наружной стороне после электролитно-плазменной обработки способны надежно противостоять коррозии в условиях хранения, дезинфекции, стерилизации и эксплуатации СКВТТ.

Таблица 5 – Анализ отчистки внутренней поверхности СКВТТ от времени и способа обработки

Образец	Потенциал коррозии $E_{корр.}$ , мВ	Плотность тока коррозии $i_{корр.}$ , А/см <sup>2</sup>	Потенциал питтингообразования $E_{питт.}$ , мВ
№1 (Шлифование)	-176	$0,65 \cdot 10^{-8}$	+38
№ 2 (Химическая очистка 5 мин)	-253	$5,64 \cdot 10^{-8}$	+180
№ 3 (Химическая очистка 10 мин)	-449	$2,17 \cdot 10^{-8}$	+402
№ 4 (Электролитно-плазменная обработка)	-188	$0,22 \cdot 10^{-8}$	+392

В четвертой главе приводится описание конструкторской документации на акустическую систему, включающую СКВТТ и описание по операциям разработанного технологического процесса изготовления изделия «Трубчатый волновод» и рассмотрено применение ультразвуковых СКВТТ в медицинской практике,

а именно, оборудование для ультразвукового воздействия на стенки кровеносных сосудов (рисунок 10).



**Рисунок 10 – Ультразвуковое оборудование для внутрисосудистого разрушения тромбообразований**

В таблице 6 приведены достигнутые точность размеров и качество рабочих поверхностей СКВТТ.

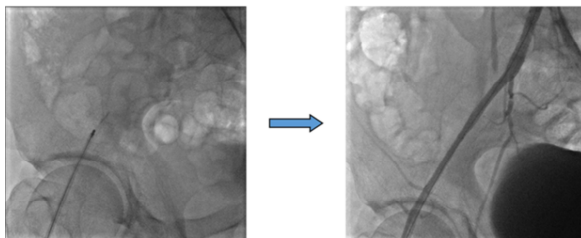
**Таблица 6 – Точность основных размеров и параметр шероховатости поверхности после основных технологических операций**

Последовательность основных технологических операций	Точность основных размеров и параметр шероховатости поверхностей
1. Формирование ступенчатых поверхностей СКВТТ волочением	Ступень $\varnothing 1,5^{+0,02}_{+0,01}$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
	Ступень $\varnothing 1,3^{+0,02}_{+0,01}$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
	Ступень $\varnothing 1,0^{+0,02}_{+0,01}$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
2. Формирование наконечника в дистальной части СКВТТ раздачей и обжимом	Отверстие $\varnothing 0,5+0,2$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
	Наконечник $\varnothing 1,35^{+0,03}_{+0,02}$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
3. Электрохимическая прошивка боковых микроотверстий в дистальной части СКВТТ	Три отверстия $\varnothing 0,3\pm 0,05$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
4. Химическая очистка внутренних поверхностей СКВТТ	Отверстие $\varnothing 1,0h12$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
	Отверстие $\varnothing 0,8h12$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
	Отверстие $\varnothing 0,5h12$ мм; $Ra = 0,32$ мкм
5. Электролитно-плазменная обработка внешней поверхности	Ступень $\varnothing 1,5h7$ мм; $Ra = 0,1$ мкм
	Ступень $\varnothing 1,3h7$ мм; $Ra = 0,1$ мкм
	Ступень $\varnothing 1,0h7$ мм; $Ra = 0,1$ мкм
	Наконечник $\varnothing 1,35k7$ мм; $Ra = 0,1$ мкм

По настоящее время Государственным предприятием «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» с применением разработанного оборудования и технологического процесса изготовлено и поставлено в клиники Республики Беларусь более 30 единиц ультразвуковых СКВТТ, которые прошли санитарно-гигиенические и технические испытания и успешную апробацию в учреждениях здравоохранения Республики Беларусь.

Экспериментально установлено, что применение в сосудистой кардиологии гибких трубчатых инструментов-волноводов длиной до 810 мм для ангиопластики обеспечивает эффективное разрушение тромбообразований, а также внутрисосудистое ремоделирование пораженной артериальной стенки путем вибромеханического воздействия.

По результатам проведенных испытаний метода установлено, что в результате 10-минутного ультразвукового воздействия происходит повышение относительной деформации сегмента «мягкого» сосуда в 1,3–1,4 раза по сравнению с исходным сосудом (рисунок 10).



**Рисунок 11– Состояние сосудов до и после ультразвуковой абляции**

На основании положительных результатов санитарно-гигиенических испытаний, технических испытаний и клинических испытаний на «Систему акустическую для эндоваскулярной абляции» № ИМ–7.105439 от 05.07.2017 г. имеется разрешение Министерства здравоохранения Республики Беларусь на производство, реализацию и медицинское применение разработанного изделия на территории Республики Беларусь.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **Основные научные результаты диссертации**

1. Расчетами подтверждены и экспериментально установлены рациональные технологические режимы безоправочного волочения (5 проходов с шагом 0,1 мм) тонкостенной  $s = 0,25$  мм трубки малого диаметра  $D = 1,5$  мм из стали 12Х18Н9 с целью формообразования ступенчатых поверхностей СКВТТ (диаметры  $D$  1,3 мм и 1,0 мм) с заданной точностью геометрических размеров рабочих поверхностей (по 7 квалитету точности) и с одновременным упрочнением материала. Показано влияние относительного обжатия и коэффициента вытяжки на усилие волочения, микроструктуру и микротвердость материала. Оптимизированы деформационные параметры процесса: относительное обжатие составляет  $\varepsilon = 0,08–0,12$ , коэффициент вытяжки составляет  $\mu = 1,09–1,13$ . Степень упрочнения материала в результате волочения в среднем составляет 1,35 (исходный предел прочности в закаленном состоянии трубки составляет  $\sigma_b = 590$  МПа, среднее значение  $\sigma_b$  после всех проходов 800 МПа). Повышение относительного обжатия  $\varepsilon$  до 0,21 приводит к росту усилия волочения в 1,5 раза и микротвердости материала с 230 до 350 HV<sub>0,2</sub>. С ростом степени деформации зерна равноосного аустенита получают преимущественную ориентацию – аксиальную текстуру [2; 5].

2. Установлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния материала путем численного компьютерного моделирования процессов раздачи и обжима трубки диаметром  $D = 1,0$  мм при формообразовании сферической дистальной части наконечника СКВТТ, что позволило определить изменения толщины стенки и длины заготовки для формирования конического участка и определить силовые режимы процесса раздачи и обжима. Получены рациональные технологические режимы данных процессов: четыре перехода при коэффициенте раздачи  $K_p = 1,11 \div 1,12$  и один переход при обжиме, с усилием деформации  $Q = 35,8 \div 98,4$  Н при раздаче и 311,5 Н при обжиме, для достижения требуемого профиля (диаметр наружный  $D = 1,35 \begin{smallmatrix} +0,03 \\ +0,02 \end{smallmatrix}$  мм) и осевого отверстия (диаметр  $d = 0,5^{+0,2}$  мм) без перегрева, разрушения и потери устойчивости заготовки [3].

3. Установлено влияние концентрации и расхода электролита и значений рабочего напряжения на точность размеров и форму боковых микроотверстий диаметром  $d = 0,3 \pm 0,05$  мм в дистальной части СКВТТ в процессе электрохимической их прошивки. Определены рациональные технологические режимы (диаметр электрода  $D_{эл.} = 0,07$  мм, рабочее напряжение  $U = 15$  В, электролит 25 % раствор натрия азотнокислого  $\text{NaNO}_3$ , расход электролита  $V = 60$  мл/мин с температурой  $T = 30 \pm 3$  °С), обеспечивающие интенсивное удаление продуктов анодного растворения из межэлектродного промежутка и стабильное протекание процесса получения микроотверстий с требуемой точностью размеров и правильной формы (допуск цилиндричности  $\text{TFZ} = 0,1$  мм) со сглаженными краями без острых кромок [1; 6].

4. Предложен способ и определены температурно-скоростные и временные параметры процесса химической очистки (до  $Ra = 0,32$  мкм) в кислотной среде внутренних поверхностей СКВТТ (диаметром  $d$  от 0,5 мм до 1,0 мм). Оптимизирован состав кислотной среды (ортофосфорная кислота  $\text{H}_3\text{PO}_4 - 78$  %, азотная кислота  $\text{HNO}_3 - 11$  %, соляная кислота  $\text{HCl} - 11$  %) и технологические режимы (температура  $T = 25$  °С, расход электролита  $V = 0,4$  мл/мин, время обработки  $t = 10$  мин) для качественного удаления окалины, повышения коррозионной стойкости с отсутствием очагов питтинговой и межкристаллитной коррозии, загрязнений зоны обработки продуктами растворения и закупоривания внутреннего канала СКВТТ. Обеспечено снижение параметра шероховатости с  $Ra = 6$  мкм до  $Ra = 0,32$  мкм, повышение коррозионной стойкости поверхности к физиологическому раствору (потенциал питтингообразования с +38 мВ увеличивается до +402 мВ) и получение поверхности, свободной от окалины, коррозии, посторонних покрытий и частиц и имеющей равномерный металлический цвет, что соответствует 3-й степени очистки по ИСО 8501-1:2007 [2; 4].

5. Экспериментально определены и обоснованы температурно-временные параметры электролитно-плазменной обработки при очистке и полировании наружных поверхностей СКВТТ в солевом электролите (4 % раствор сульфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , рабочее напряжение  $U = 300$  В при температуре  $T = 90$  °С, время обработки  $t = 240$  секунд), необходимые для полного удаления окалины, снижения параметра шероховатости до  $Ra = 0,1$  мкм, обеспечения 7 качества точности размеров, повышения коррозионной стойкости и придания поверхности СКВТТ однородного блеска  $\theta = 62$  % без существенного съема материала (0,01 мм на сторону). Одновременно

обеспечивается повышение потенциала питтингообразования до +392 мВ со снижением в три раза плотности тока коррозии (от  $0,65 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup> до  $0,22 \cdot 10^{-8}$  А/см<sup>2</sup>) [2; 4].

6. Разработаны технологические основы формирования точности и качества рабочих поверхностей СКВТТ, обеспечивающие формообразование требуемой геометрии, высокие прочностные характеристики изделия и его надежную эксплуатацию. Внедрен технологический процесс изготовления СКВТТ для ультразвукового воздействия на стенки кровеносных сосудов, отличающийся комплексной обработкой, включающей безоправочное волочение, раздачу и обжатию, химическую очистку и электролитно-плазменную обработку [2; 4].

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


Разработана технология изготовления СКВТТ для ультразвукового воздействия на стенки кровеносных сосудов с высокими прочностными и акустическими характеристиками.

Применение результатов работы связано с разработкой и внедрением в клиническую практику принципиально нового метода восстановления сосудистой проходимости и податливости сосудистой стенки: инфузионно-аспирационной ультразвуковой ангиопластики. В медицинской практике СКВТТ эффективно используются в волноводно-катетерной системе с формированием на конце волновода кавитационной струи жидкости для разрушения тромбообразований и лечения пораженных сосудов.

Преимуществами разработанного ультразвукового метода воздействия на кровеносные сосуды перед традиционными терапевтическими и хирургическими методами являются отсутствие оперативного вмешательства; низкая вероятность осложнений; невысокая стоимость лечения.

Разработанные в рамках диссертационного исследования технологический процесс и опытно-экспериментальное оборудование: приспособление для формирования переходов СКВТТ; приспособление для правки заготовки СКВТТ; приспособление для формирования наконечника СКВТТ; установка для прошивания микроотверстий в СКВТТ использовались при выполнении инновационных проектов, заданий по научно-исследовательским работам и внедрены на ГП «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» при изготовлении СКВТТ для внутреннего ультразвукового воздействия на кровеносные сосуды в соответствии с разработанной с участием аспиранта конструкторской и технологической документации: акустическая система (КД ИШПЖ 71.00.00.000 СБ); технологический процесс изготовления изделия «Трубчатый волновод» (КД ИШПЖ 01.2018).

По настоящее время Государственным предприятием «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» с применением разработанного оборудования и технологического процесса изготовлено и поставлено в клиники РБ более 30 единиц ультразвуковых ступенчатых концентраторов волноводов трубчатого типа, которые прошли санитарно-гигиенические и технические испытания и успешную апробацию в учреждениях здравоохранения Республики Беларусь.



## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

### **Статьи в научных изданиях в соответствии с п. 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь**

1. Электрохимическая прошивка микроотверстий в трубчатом ступенчатом концентраторе-волноводе медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королев, А. С. Будницкий, Дай Вэньци // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2019. – Т. 18. – № 5. – С. 12–14.

2. Пластическое деформирование и электрофизикохимическая обработка трубчатых медицинских концентраторов-волноводов / Дай Вэньци, Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королев, А. С. Будницкий // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2020. – Т. 19. – № 6. – С. 499–506.

3. Пластическое формообразование наконечника концентратора-волновода для ультразвуковой эндоваскулярной абляции / Дай Вэньци, Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королев, А. С. Будницкий // Наука и техника. – Минск: БНТУ, 2021. – Т. 20. – № 2. – С. 101–108.

### **Материалы конференций**

4. Конструкция и технология получения ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / Ю. Г. Алексеев, В. Т. Минченя, А. Ю. Королев, Дай Вэньци // Новые горизонты – 2017: сборник материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, 2–3 ноября 2017 г.: в 2 т. – Минск: БНТУ, 2017. – Т. 2. – С. 18–19.

5. Формообразование ступенчатых поверхностей ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов с применением волочения / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королев, В. Т. Минченя, Дай Вэньци // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тезисы докладов 33-й международной научно-практической конференции, Минск, 11 апреля 2018 г.; редкол.: В. К. Шелег (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Бизнесофсет, 2018. – С. 18–19.

6. Электрохимическая прошивка микроотверстий в сферическом наконечнике трубчатого ступенчатого концентратора-волновода медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королев, А. С. Будницкий, Дай Вэньци // VIII форум вузов инженерно-технологического профиля Союзного государства: сборник материалов, г. Минск, 29 октября – 01 ноября 2019 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск: БНТУ, 2019. – С. 7–8.

## РЭЗІЮМЭ

### Дай Вэньцы

#### **Тэхналагічнае забеспячэнне камбінаванага формаўтварэння ступеністых канцэнтратараў-хваляводаў трубчастага тыпу для ультрагукавага ўздзеяння на крывяносныя сасуды з зададзенымі параметрамі дакладнасці і якасці працоўных паверхняў**

**Ключавыя словы:** тромбаўтварэнне, ультрагук, канцэнтратар-хвалявод, формаўтварэнне, дакладнасць памераў, валачэнне, раздача, абціск, электрахімічная прашыўка, электrolітна-плазменная апрацоўка

**Мэта даследавання:** распрацоўка тэхналагічнага забеспячэння камбінаванага формаўтварэння ступеністых канцэнтратараў-хваляводаў трубчастага тыпу з зададзенымі параметрамі дакладнасці і якасці працоўных паверхняў для ультрагукавага ўздзеяння на крывяносныя сасуды.

**Метады даследавання і выкарыстаная апаратура:** метады канчатковых элементаў у асяроддзі праграмага комплексу ABAQUS лікавага мадэлявання працэсаў формаўтварэння, макра- і мікраструктурны аналіз, аптычныя бескантактавыя метады вымярэння формы, памераў і шурпатасці, фізика-хімічныя метады даследаванняў уласцівасцяў матэрыялаў

**Атрыманія вынікі і іх навізна:** устаноўлены, тэарэтычна абгрунтаваны і эксперыментальна пацверджаны: рэжымы формаўтварэння ступеністых паверхняў і асаблівасці фарміравання мікраструктуры і ўласцівасцяў (мікрацвердасць) павярхоўнага пласта ў працэсе валачэння; дыяпазоны рэжымаў формаўтварэння працоўнага наканечніка і рэжымы электрахімічнай прашыўкі мікраадтулін, якія забяспечваюць фармаванне патрабаванай геаметрыі і высокія трывальныя характарыстыкі выраба; заканамернасці ўплыву тэхналагічных параметраў на якасць хімічнай ачысткі ўнутраных паверхняў і працягласці электrolітна-плазменнай апрацоўкі на працэс поўнага выдалення акаліны, зніжэнні шурпатасці і надання вонкавым паверхням аднастайнага бляску без істотнага здыму металу.

**Ступень выкарыстання:** тэхналагічны працэс атрымання ступеністага канцэнтратара-хвалявода трубчастага тыпу ўкаранены на Дзяржаўным прадпрыемстве “Навукова-тэхналагічны парк БНТУ «Палітэхнік»” і выкарыстоўваецца для камплектацыі ультрагукавых устаноў медыцынскага прызначэння.

**Вобласць ужывання:** ступеністы канцэнтратар-хвалявод трубчастага тыпу ўжываецца ў акустычных сістэмах для ўздзеяння на крывяносныя сасуды ў тэхналогіі лячэння пацыентаў з сіндромам дыябетычнай ступні.



## РЕЗЮМЕ

Дай Вэньци

### **Технологическое обеспечение комбинированного формообразования ступенчатых концентраторов-волноводов трубчатого типа для ультразвукового воздействия на кровеносные сосуды с заданными параметрами точности и качества рабочих поверхностей**

**Ключевые слова:** тромбообразования, ультразвук, концентратор-волновод, формообразование, точность размеров, волочение, раздача, обжим, электрохимическая прошивка, электролитно-плазменная обработка

**Цель исследования:** разработка технологического обеспечения комбинированного формообразования ступенчатых концентраторов-волноводов трубчатого типа с заданными параметрами точности и качества рабочих поверхностей для ультразвукового воздействия на кровеносные сосуды

**Методы исследования и использованная аппаратура:** метод конечных элементов в среде программного комплекса ABAQUS численного моделирования процессов формообразования, макро- и микроструктурный анализ, оптические бесконтактные методы измерения формы, размеров и шероховатости, физико-химические методы исследований свойств материалов.

**Полученные результаты и их новизна:** установлены, теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены: режимы формообразования ступенчатых поверхностей и особенности формирования микроструктуры и свойств (микротвердость) поверхностного слоя в процессе волочения; диапазоны режимов формообразования рабочего наконечника и режимы электрохимической прошивки микроотверстий, обеспечивающие формирование требуемой геометрии и высокие прочностные характеристики изделия; закономерности влияния технологических параметров на качество химической очистки внутренних поверхностей и продолжительности электролитно-плазменной обработки на процесс полного удаления окалины, снижения шероховатости и придания наружным поверхностям однородного блеска без существенного съема металла.

**Степень использования:** технологический процесс получения ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа внедрен на Государственном предприятии “Научно-технологический парк БНТУ «Политехник»” и используется для комплектации ультразвуковых установок медицинского назначения.

**Область применения:** ступенчатый концентратор-волновод трубчатого типа применяется в акустических системах для воздействия на кровеносные сосуды в технологии лечения пациентов с синдромом диабетической стопы.

## SAMMARY

Dai Wenqi

### **Technological support for combined shaping tubular-type stepped concentrators-waveguides for ultrasonic impact on blood vessels with specified parameters of accuracy and quality of working surfaces**

**Keywords:** thrombosis, ultrasound, stepped hub-waveguide of tubular type, forming, drawing, distribution, crimping, electro-chemical firmware, electrolyte-plasma treatment. The purpose of the work: development of technology for obtaining a stepped hub-waveguide of tubular type for intravascular destruction of thrombosis

**Key words:** development of technological support for the combined formation of stepped tube-type waveguide concentrators with specified parameters of accuracy and quality of working surfaces for ultrasonic influence on blood vessels.

**The purpose of the study:** development of technological support for the formation of the accuracy and quality of the working surfaces of a tubular-type stepped concentrator-waveguide for ultrasonic treatment of blood vessels.

**Research methods and equipment used:** finite element method in the environment of the ABAQUS software package for numerical modeling of shaping processes, macro- and microstructural analysis, optical non-contact methods for measuring shape, size and roughness, physicochemical methods for studying the properties of materials.

**The obtained results and their novelty:** established, theoretically substantiated and experimentally confirmed: modes of formation of stepped surfaces and features of the formation of microstructure and properties (microhardness) of the surface layer in the process of drawing; Ranges of modes of forming the working tip and modes of electro-chemical firmware of microholes, ensuring the formation of the required geometry and high strength characteristics of the product; regularities of the influence of technological parameters on the quality of chemical cleaning of internal surfaces and the duration of electrolyte-plasma treatment on the process of complete removal of scale, reducing roughness and giving the outer surfaces a uniform shine without significant metal removal.

**Degree of use:** the technological process of obtaining a stepped hub-waveguide of the tubular type was implemented at the State Enterprise "Scientific and Technological Park of BNTU "Polytechnic" and is used to complete ultrasonic devices for medical purposes.

**Field of application:** tubular stepped waveguide concentrator is used in acoustic systems to affect blood vessels in the treatment technology of patients with diabetic foot syndrome.

Научное издание

Дай Вэньци

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОМБИНИРОВАННОГО  
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ СТУПЕНЧАТЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ-  
ВОЛНОВОДОВ ТРУБЧАТОГО ТИПА ДЛЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО  
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА КРОВЕНОСНЫЕ СОСУДЫ С ЗАДАННЫМИ  
ПАРАМЕТРАМИ ТОЧНОСТИ И КАЧЕСТВА РАБОЧИХ  
ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 05.02.07 – технология и оборудование механической  
и физико-технической обработки

Подписано в печать 05.12.2023. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Цифровая печать.  
Усл. печ. л. 1,45. Уч.-изд. л. 1,43. Тираж 60. Заказ 1002.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя  
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.