

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.9.047.7:621.778.04

КОРОЛЁВ
Александр Юрьевич

**ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ
ДЛИННОМЕРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ
ВОЛНОВОДОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА
ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Минск, 2013

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель

Алексеев Юрий Геннадьевич,
кандидат технических наук, генеральный директор Государственного предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» – проректор по производственной деятельности

Официальные оппоненты:

Акулович Леонид Михайлович,
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология металлов» Белорусского государственного аграрного технического университета;

Синькевич Юрий Владимирович,
кандидат технических наук доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета

Оппонирующая организация

Государственное научное учреждение «Физико-технический институт» Национальной академии наук Беларуси

Защита состоится 15 марта 2013 г. в 14.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 в Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, Минск, пр. Независимости, 65, корп. 1, ауд. 202. Тел. ученого секретаря (+375 17) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 13 февраля 2013 г.

Ученый секретарь

совета по защите диссертаций,
доктор технических наук, профессор

О.Г. Девойно

© Королёв А.Ю., 2013

© Белорусский национальный
технический университет, 2013

ВВЕДЕНИЕ

Около 75 % всех сердечно-сосудистых заболеваний связаны с атеросклерозом. Несмотря на достижения в лечении сердечно-сосудистых заболеваний, данная патология продолжает оставаться главной причиной заболеваемости и смертности в Беларуси и в мире. В последнее время в качестве альтернативы существующим дорогостоящим и травматическим методам лечения сосудов в сосудистой кардиологии широко используется новый метод и оборудование для ультразвукового разрушения тромбов. Разрушение атеросклеротических образований достигается за счет механического и кавитационного внутрисосудистого воздействия с помощью гибкого волновода диаметром 0,5–1,8 мм и длиной до 1200 мм. По оценкам кардиологов потребность в операциях по ультразвуковому разрушению тромбов только в Беларуси составляет около 300 в год.

Работы по разработке ультразвуковых волноводных систем для разрушения тромбов внутри сосудов в настоящее время проводятся Германии, США и Ирландии. Однако до настоящего времени не решена проблема создания технологии получения гибких длинномерных волноводов малого диаметра, обладающих высокими акустическими и прочностными характеристиками и обеспечивающих усиление амплитуды продольных колебаний. Существующие процессы получения длинномерных изделий малого диаметра, основанные на пластических методах, механической обработке и физико-технических методах, имеют ряд недостатков, не позволяющих изготавливать волноводы с требуемыми характеристиками. В этой связи актуальными как в научном, так и в практическом плане являются работы, направленные на разработку и исследование технологии, обеспечивающей получение длинномерных медицинских волноводов малого диаметра для ультразвукового разрушения тромбов с высокими прочностными и акустическими характеристиками.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами и темами

Научные исследования по теме диссертации проводились в рамках: инновационного проекта «Разработать конструкцию, технологию изготовления и методику применения в клинической практике гибких волноводов для ультразвукового тромболитического периферических артерий», № ГР 20051449, 2005–2007 г.г.; ГНТП «Лечебные и диагностические технологии», подпрограмма «Сердце и сосуды», задание 1.14 «Разработать и внедрить метод ультразвуковой реканализации у больных с поражением брахиоцефальных артерий», №ГР 20062874, 2007–2008 г.г.; ГПОФИ «Высокоэнергетические, ядерные и радиационные технологии», задание 3.18 «Исследование физико-химических

процессов на границе электролит-металл в условиях мощных электрических полей и знакопеременных гидродинамических потоков и создание процессов формирования и обработки поверхностей металлических изделий сложной конфигурации», №ГР 20073121, 2006–2010 г.г.; ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы, наноматериалы», задание 5.2.11 «Исследование явлений фазовых переходов в электропроводящих жидкостях при разнополярных и нестационарных режимах электролитно-плазменной обработки металлов и неметаллов и создание процессов модификации поверхности путём формообразования, управления структурой и деструкции», № ГР 20110700, 2011–2013 г.г.

Цель и задачи исследования

Цель работы – разработка технологии получения сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра электролитно-плазменной обработкой, обеспечивающей высокие прочностные и акустические характеристики материала для надёжной работы в агрессивной среде в условиях высоких знакопеременных напряжений.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

- обосновать конструкцию и материал волновода, исходя из анализа условий его эксплуатации, параметров и характера распространения ультразвуковых колебаний; выполнить сравнительный анализ, провести экспериментальные испытания и предложить наиболее приемлемый метод получения сложнопрофильных поверхностей длинномерных изделий малого диаметра (волновода);

- исследовать влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства (микроструктура, фазовый состав, микротвердость, параметры тонкой структуры, остаточные напряжения) поверхностного слоя заготовки волновода, получаемой волочением с последующей электролитно-плазменной обработкой;

- установить режимы волочения с промежуточной электролитно-плазменной обработкой, обеспечивающие получение заготовки волновода с высокими прочностными и акустическими характеристиками;

- установить закономерности влияния параметров на скорость съема металла в процессе размерной электролитно-плазменной обработки цилиндрических поверхностей малого диаметра, определить область допустимых значений параметров для выполнения размерной электролитно-плазменной обработки; установить параметры, обеспечивающие максимальную скорость съема металла;

- разработать математическую модель для расчета скорости съема металла в процессе электролитно-плазменной обработки цилиндрических длинномерных поверхностей малого диаметра;

– разработать технологию получения ультразвуковых волноводов малого диаметра с высокими прочностными и акустическими характеристиками, включающую процесс изготовления заготовки волновода волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой и процесс формообразования поверхностей волновода методом размерной электролитно-плазменной обработки; внедрить в производство технологию и оборудование для получения волноводов, внедрить волноводы в медицинскую практику.

Объект и предмет исследования

Объект исследования – сложнопрофильные длинномерные ультразвуковые медицинские волноводы малого диаметра, обладающие высокими прочностными и акустическими характеристиками и способные работать в условиях высоких знакопеременных напряжений в агрессивной среде.

Предмет исследования – технология получения сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра электролитно-плазменной обработкой.

Положения диссертации, выносимые на защиту

1. Результаты экспериментальных исследований структуры и свойств (остаточных напряжений, микротвердости, плотности дислокаций, фазового состава) поверхностного слоя после деформации с последующей электролитно-плазменной обработкой, позволившие установить положительное влияние электролитно-плазменной обработки в качестве промежуточной операции между проходами волочения при получении заготовки волновода.

2. Результаты экспериментальных исследований влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе получения заготовки волновода волочением на прочностные и акустические характеристики, позволившие установить, что применение электролитно-плазменной обработки между проходами волочения приводит к повышению предела выносливости и акустических характеристик материала заготовки за счет снижения величины растягивающих остаточных напряжений и удаления дефектных слоёв в процессе электролитно-плазменной обработки.

3. Результаты экспериментальных исследований закономерностей влияния параметров электролитно-плазменной обработки (температуры электролита, рабочего напряжения, глубины погружения) и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности на скорость съема металла, позволившие определить область допустимых значений параметров для выполнения размерной электролитно-плазменной обработки длинномерных цилиндрических поверхностей малого диаметра, степень влияния каждого из параметров на скорость съема металла, а также совокупность параметров, обеспечивающую максимальную скорость съема металла.

4. Математическая модель формообразования цилиндрических длинномерных поверхностей малого диаметра в процессе размерной электролитно-плазменной обработки, учитывающая связь скорости съема металла с плотностью тока, характеризующая влияние технологических параметров процесса электролитно-плазменной обработки и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности на плотность рабочего тока, позволившая выполнить расчет скорости съема металла и необходимой продолжительности обработки с учетом изменения радиуса кривизны.

Личный вклад соискателя

Первоначально работа выполнялась под руководством академика НАН Беларуси, д.т.н., проф. Степаненко А.В.

При выполнении работы исполнителем лично: выполнен анализ и экспериментальные исследования различных методов формообразования сложно-профильных поверхностей длинномерных изделий малого диаметра; проведены исследования особенностей формирования парогазовой оболочки и закономерностей съема металла при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей; проведены экспериментальные исследования влияния параметров электролитно-плазменной обработки на скорость съема металла; разработана математическая модель формообразования поверхностей малого диаметра в процессе электролитно-плазменной обработки; разработана технология и оборудование для получения волноводов.

Научный руководитель соискателя к.т.н. Алексеев Ю.Г. участвовал в определении цели и задач, в обсуждении результатов исследований, написании статей и заявок на патенты, оказывал консультационную и практическую помощь на всех этапах выполнения диссертации. В соавторстве с д.т.н., проф. Исаевичем Л.А. исследовано влияние промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе получения заготовки волновода волочением на прочностные и акустические характеристики материала. Совместно с к.т.н., проф. Минченей В.Т. определялась надежность и выполнялись измерения амплитуды продольных колебаний волноводов. Академик НАН Беларуси, д.м.н., проф. Мрочек А.Г. и д.м.н., проф. Адзерихо И.Э. оказывали содействие при исследовании условий эксплуатации и обосновании конструкции волновода. Совместно с к.т.н. Фомихиной И.В. исследовалось влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя.

Апробация результатов диссертации

Основные положения диссертации доложены и обсуждены на: V Республиканской научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь (г. Гродно, 2000 г.); Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии обработки материалов давлением», посвященной 100-летию со дня рождения академика АН БССР В.П. Северденко

(г. Минск, 2004 г.); 3-й Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике» (г. Минск, 2005 г.); Международной научно-технической конференции «Порошковая металлургия: достижения и проблемы» (г. Минск, 2005 г.); Международной научно-технической конференции «Инженерия поверхности» (г. Брест, 2007 г.); Международном симпозиуме «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка» (г. Минск, 2009 г.); II Международной научно-практической конференции, посвященной 85-летию со дня рождения академика О.В. Романа, 55-летию кафедры «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» БНТУ (г. Минск, 2010 г.); Международной научно-технической конференции «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» БРГУ (г. Могилёв, 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» БНТУ (г. Минск, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике», (г. Минск, 2012 г.); VI Международной научно-технической конференции «Современные методы и технологии создания и обработки материалов» (г. Минск, 2012 г.).

Опубликованность результатов

По результатам исследований опубликованы 23 печатные работы, в том числе 8 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК (3,1 авторских листа), 7 статей и 5 тезисов докладов в сборниках материалов международных конференций, 2 патента на изобретение, 1 положительное решение о выдаче патента на полезную модель.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Работа содержит 229 страниц, в том числе 96 страниц машинописного текста, 14 таблиц и 76 иллюстраций на 37 страницах, 13 страниц библиографического списка из 114 источников и 83 страницы приложения, включающего документы о внедрении полученных результатов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ конструкций, условий работы существующих ультразвуковых стержневых волноводов, применяемых в медицинской практике, а также обзор методов получения сложнопрофильных длинномерных поверхностей малого диаметра.

К стержневым ультразвуковым волноводам предъявляются жесткие требования по прочностным и акустическим характеристикам. Материал волновода должен обладать высокой надежностью при значительных циклических нагружениях, т.е. должен иметь высокий предел прочности и предел выносли-

ности. Для надежной передачи ультразвука материал должен обладать низким коэффициентом затухания и низким количеством микро- и макродефектов. При этом необходимым условием является однородность этих характеристик, а также однородность микроструктуры по всей длине волновода.

Для изготовления волноводов в настоящее время используются прутки и проволока, получаемые волочением. Основным недостатком таких заготовок, является наличие неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностных слоях материала, приводящих к значительному снижению усталостной прочности. Волочение также сопровождается появлением микро- и макродефектов в виде поперечных складок, микротрещин, царапин, продуктов износа инструмента, скоплений дислокаций, снижающих прочностные характеристики материала. Дефекты, образующиеся в структуре материала волноводов, приводят также к нарушению акустической однородности, что является причиной поглощения, отражения и рассеивания волн.

Существующие методы формообразования сложнопрофильных длинномерных поверхностей малого диаметра, основанные на пластических методах, механической обработке и физико-технических методах, имеют ряд недостатков, не позволяющих получать волноводы с требуемыми характеристиками. Основными недостатками являются неоднородность структуры и прочностных характеристик по длине волновода, изменение структуры и свойств поверхности из-за силового и термического воздействия, низкое качество поверхности, необходимость присоединения рабочего наконечника. Для решения проблемы создания волноводов с высокими прочностными и акустическими характеристиками предложена технология, включающая два этапа:

1. получение цилиндрической заготовки волновода методом волочения с промежуточной электролитно-плазменной обработкой (ЭПО), выполняемой между проходами для повышения прочностных и акустических характеристик материала за счет удаления образующихся при волочении дефектных поверхностных слоёв;

2. формообразование поверхностей волноводов путем размерной ЭПО, обеспечивающей съём металла с поверхности заготовки без внесения изменений в структуру.

На основании проведенного анализа сформулированы цель и основные задачи диссертационной работы.

Во второй главе приводится обоснование конструкции и материала волновода (объекта исследования), а также описание методов проведения экспериментальных исследований и применяемого оборудования.

На основании анализа конструкций существующих медицинских волноводов, а также по результатам исследования форм артерий пациентов в качестве объекта исследований приняты волноводы в виде ступенчатого цилиндри-

ческого стержня со сферическим наконечником с диаметрами ступеней от 1,8 до 0,5 мм (рисунок 1), обеспечивающие повышение амплитуды продольных колебаний в 2,5–3 раза, минимальные потери и возможность прохождения волноводов по извилистым сосудам за счет высокой гибкости дистальной части. Применение в качестве материала волновода высокопрочной аустенитной стали 12Х18Н9 с низким коэффициентом акустических потерь позволяет обеспечить надежную работу в агрессивной среде при высоких знакопеременных напряжениях.

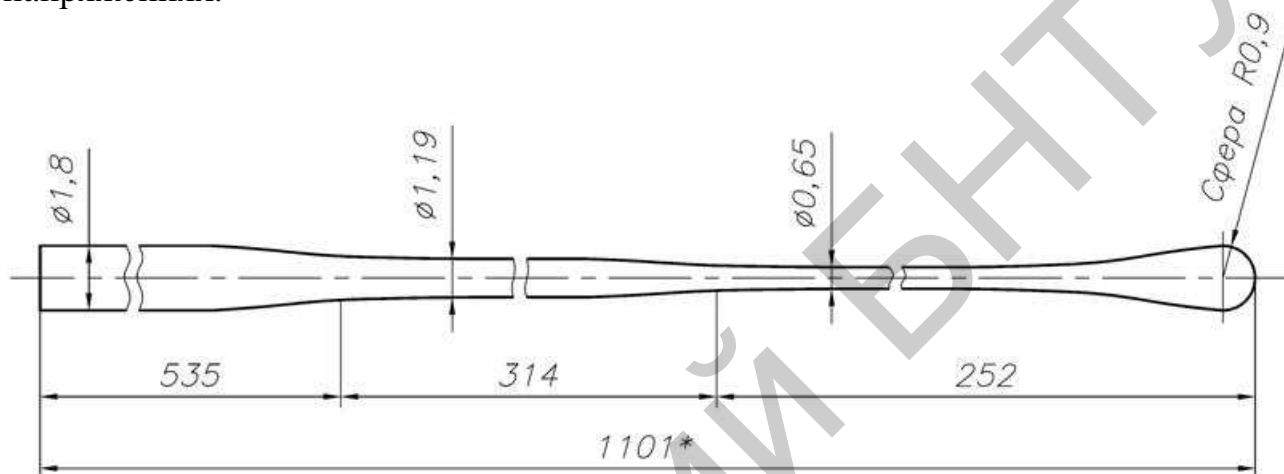


Рисунок 1 – Пример волновода для разрушения громбов

Металлографические исследования проводились на световом микроскопе «Reichert». Рентгеноструктурные исследования проводились на дифрактометре общего назначения ДРОН-3.0 в CuK_α монохроматизированном излучении, вторичная монохроматизация осуществлялась пиролитическим графитом с вращением образца в собственной плоскости. Электронно-микроскопические исследования поверхностных слоев пластин после ЭПО проводилось на просвечивающем электронном микроскопе ЭМ-125 при ускоряющем напряжении 125 кВ.

Измерения микротвердости выполнялись на микротвердомере «Micromet-II» с нагрузкой 25 г методом косого шлифа.

Для исследования влияния промежуточной ЭПО между проходами волочения на прочностные и акустические характеристики заготовки волновода использовался маршрут волочения, выбранный на основании справочных данных, включающий семь проходов и обеспечивающий суммарное обжатие $\delta_{\text{сум.}} = 80\%$, необходимое для достижения предела прочности до 1400 МПа. Волочение осуществлялось на цепном волочильном стане, промежуточная ЭПО – на установке ЭПО.

Исследование влияния ЭПО между проходами волочения на распределение остаточных напряжений в образцах проводилось методом замера прогибов.

Приведение круглого профиля образцов к прямоугольному проводилось путем сошлифовывания лысок.

Исследование влияния ЭПО между проходами волочения на эксплуатационные характеристики материала проводилось путём сравнения усталостной прочности и акустических характеристик образцов, полученных волочением и волочением с промежуточной ЭПО. Испытания на усталостную прочность заключались в определении числа циклов, приводящих к разрушению образцов при заданных величинах напряжений, и в определении предельного напряжения, при котором не происходило разрушение при максимальном числе циклов нагружения. Исследование влияния ЭПО на затухание ультразвука проводилось путем оценки изменения интенсивности передаваемых ультразвуковых колебаний. Интенсивность передаваемых колебаний оценивалась калориметрическим методом. Для создания ультразвуковых колебаний при исследовании акустических характеристик, а также циклических нагрузок при исследовании усталостной прочности использовался ультразвуковой генератор мощностью 80 Вт, позволяющий генерировать колебания частотой от 22 до 28 кГц с амплитудой до 180 мкм.

Исследование особенностей формирования парогазовой оболочки и закономерностей съема при ЭПО цилиндрических поверхностей проводилось на лабораторной установке ЭПО-3. Измерение размеров образцов проводилось с помощью цифрового микрометра с ценой деления 0,001 мм.

В третьей главе приведены результаты исследования влияния промежуточной ЭПО в процессе волочения на характеристики материала при получении заготовки длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов.

В результате исследований влияния ЭПО на структуру и свойства поверхности деформированного материала установлено, что ЭПО продолжительностью от 1 до 10 мин приводит к изменению характеристик поверхностного слоя толщиной до 22 мкм, которое заключается в снижении плотности дислокаций с $1,52 \cdot 10^{10}$ до $0,77 \cdot 10^{10}$ см⁻², изменении фазового состава с уменьшением содержания мартенсита с 88,7 % до 57,4 % и повышением содержания аустенита с 11,3 % до 42,6 %, снижении микротвердости с 4100 до 2500 МПа.

Установлено, что применение ЭПО между проходами волочения обеспечивает снижение величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое (рисунок 2). Чем больше продолжительность ЭПО, тем ниже величина остаточных напряжений. Так, ЭПО продолжительностью 10 мин приводит к снижению величины растягивающих остаточных напряжений на поверхности с 1080 до 770 МПа. Однако наиболее интенсивное снижение остаточных напряжений происходит при ЭПО продолжительностью до 3 мин.

Снижение величины растягивающих остаточных напряжений при волочении с ЭПО обусловлено: удалением между проходами волочения слоя с повышенной плотностью дислокаций, разупрочнением поверхностного слоя и уменьшением шероховатости поверхности, приводящем к снижению коэффициента трения.

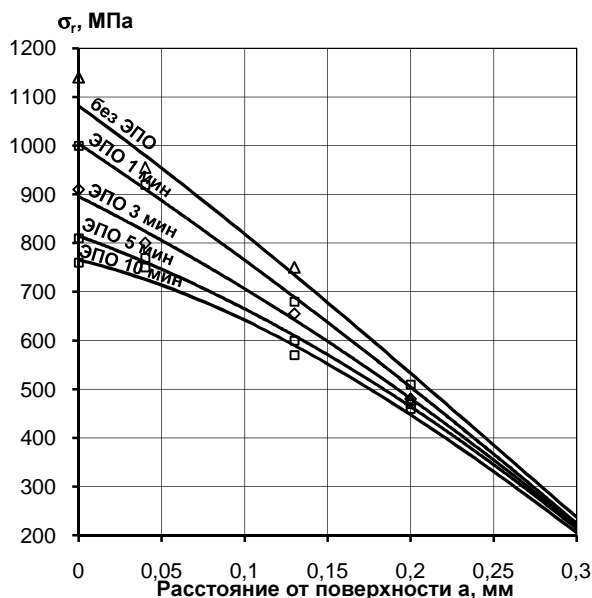
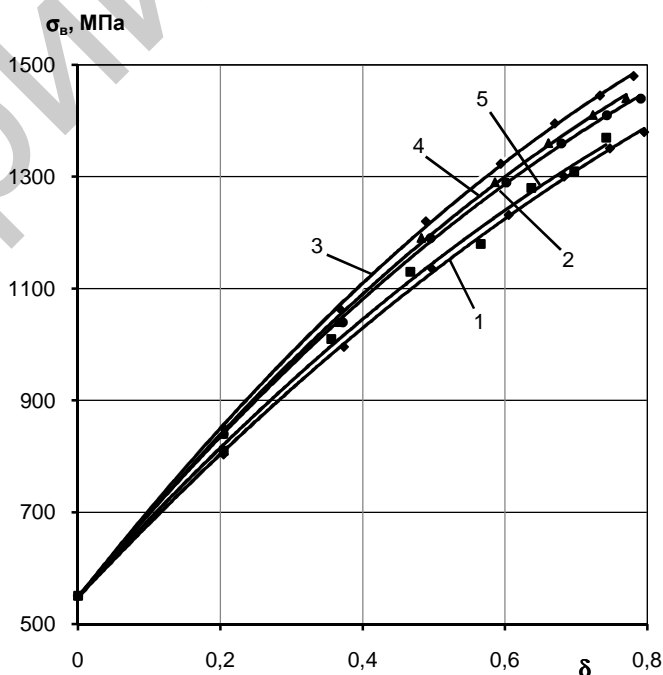


Рисунок 2 – Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое образцов, полученных волочением с различной продолжительностью промежуточной ЭПО

Из рисунка 3 видно, что несмотря на снижение суммарной степени обжатия, применение промежуточной ЭПО продолжительностью до 3 мин между проходами волочения приводит к повышению предела прочности, что объясняется уменьшением плотности дефектов в структуре материала вследствие применения ЭПО между проходами волочения, а также уменьшением величины неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений в периферийных слоях образцов. Дальнейшее увеличение продолжи-

Для оценки влияния промежуточной ЭПО на предел прочности с учетом уменьшения суммарных обжатий в результате съема металла исследовались экспериментальные кривые деформационного упрочнения (рисунок 3). Кривые построены на основе аппроксимации значений предела прочности, измеренных при испытаниях на разрыв образцов, полученных волочением с промежуточной ЭПО различной продолжительности.



1 – без ЭПО ($\delta_{\text{сум.}} = 0,795$); 2 – ЭПО 1 мин ($\delta_{\text{сум.}} = 0,795$); 3 – ЭПО 3 мин ($\delta_{\text{сум.}} = 0,779$); 4 – ЭПО 5 мин ($\delta_{\text{сум.}} = 0,767$); 5 – ЭПО 10 мин ($\delta_{\text{сум.}} = 0,735$)

Рисунок 3 – Экспериментальные кривые деформационного упрочнения стали 12X18H9 при волочении с промежуточной ЭПО

тельности ЭПО приводит к постепенному снижению предела прочности материала, что вызвано недостаточной степенью деформационного упрочнения из-за существенного снижения суммарной степени обжатия в результате съема металла в процессе промежуточной ЭПО.

На основании анализа кривых, характеризующих изменение предела прочности и величины остаточных напряжений от продолжительности промежуточной ЭПО (рисунок 4) установлено, что для обеспечения высокой прочности и низких остаточных напряжений в заготовке волновода наиболее приемлемым является процесс волочения с промежуточной ЭПО между проходами продолжительностью 3 мин, что обеспечивает повышение предела прочности материала с 1380 МПа до 1480 МПа и снижение величины растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое с 1080 МПа до 880 МПа по сравнению с волочением без применения промежуточной ЭПО.

Исследования эксплуатационных характеристик образцов, полученных методом волочения с промежуточной ЭПО показали, что максимальное повышение предела выносливости (на 21 %) также обеспечивается при ЭПО продолжительностью 3 мин (рисунок 5). Повышение интенсивности передаваемого ультразвука при этом составляет 22–24%.

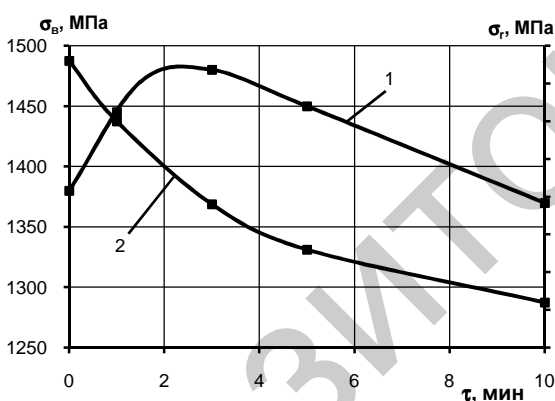
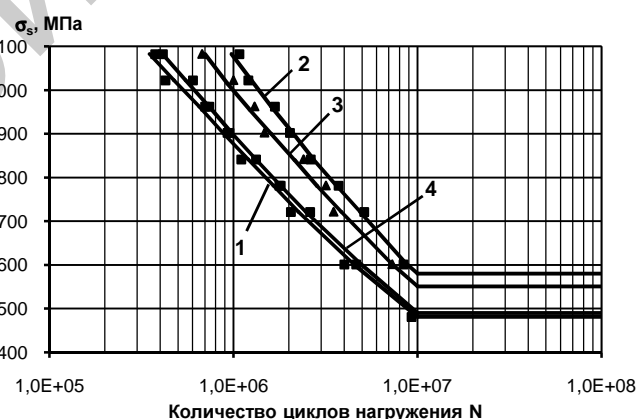


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности (кривая 1) и остаточных напряжений в поверхностном слое (кривая 2) от продолжительности промежуточной ЭПО



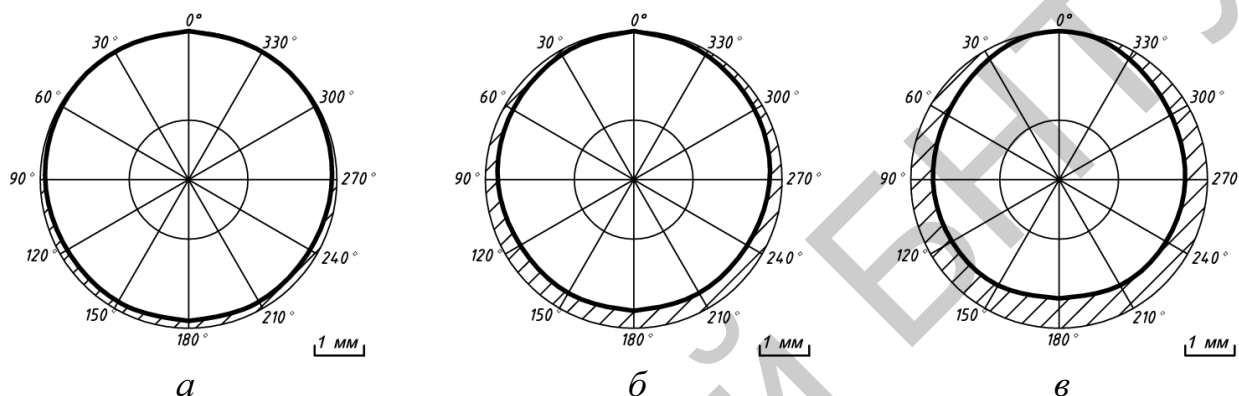
1 – без ЭПО; 2 – ЭПО 3 мин; 3 – ЭПО 5 мин; 4 – ЭПО 10 мин

Рисунок 5 – Кривые усталости образцов после волочения и после волочения с промежуточной ЭПО

Четвертая глава посвящена исследованиям процесса размерной ЭПО цилиндрических длинномерных поверхностей малого диаметра.

Установлено, что вокруг поверхности цилиндрических образцов, как при их вертикальной, так и при горизонтальной ориентации, происходит неравномерное формирование парогазовой оболочки, толщина которой определяет скорость съема металла. При горизонтальной ориентации образца съем металла

с верхней зоны образца практически отсутствует (ничтожно мал по сравнению со съемом в нижней зоне образца). На рисунке б показано изменение профиля цилиндрического образца в процессе ЭПО при горизонтальной ориентации. Причиной неравномерности размерного съема, как в случае с вертикальной ориентацией образца, так и в случае с горизонтальной, является изменение гидростатического давления по высоте образца, увеличение толщины парогазовой оболочки из-за поднимающихся пузырей пара и газа, а также перепад давления электролита при их выходе на поверхность.



а – 1 ч; б – 2 ч; в 3 – ч

Рисунок 6 – Изменение профиля цилиндрического образца в процессе ЭПО при горизонтальной ориентации

Установлено, что неравномерность съема металла при горизонтальной ориентации может быть компенсирована за счет придания образцу в процессе обработки вращения вокруг продольной оси. При этом скорость вращения может быть незначительной (например, до 30 мин^{-1}).

В результате экспериментальных исследований установлены зависимости, характеризующие влияние параметров процесса ЭПО на скорость съема металла с заготовки диаметром 1,8 мм: при уменьшении температуры электролита с 99 до $42 \text{ }^{\circ}\text{C}$ средняя скорость съема металла повышается в 6,2 раза (с 2,0 до 12,5 мкм/мин); при снижении рабочего напряжения с 300 В до 200 В средняя скорость съема металла повышается в 1,6 раза (с 5,9 мкм/мин до 9,5 мкм/мин), при увеличении глубины погружения с 5 до 245 мм средняя скорость съема металла повышается в 1,2 раза (с 6,5 мкм/мин до 5,3 мкм/мин). Определены диапазоны допустимых технологических параметров процесса для реализации размерной ЭПО цилиндрических поверхностей малого диаметра из стали 12Х18Н9: температура электролита – $70\text{--}95 \text{ }^{\circ}\text{C}$; рабочее напряжение – 240–300 В, глубина погружения может быть неограниченной, однако с точки зрения практической реализации глубина погружения должна составлять 5–125 мм.

Установлено, что повышение плотности тока при изменении параметров ЭПО приводит к повышению скорости съема металла. Зависимость скорости съема металла от плотности тока имеет линейный характер.

На основании анализа результатов, полученных при проведении экспериментальных исследований, предложена математическая модель для расчета скорости съема металла, основанная на пропорциональной связи технологических параметров процесса ЭПО и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности с плотностью тока. Расчетная схема модели основана на равенстве давлений, действующих на прямолинейный и криволинейный участки парогазовой оболочки (рисунок 7).

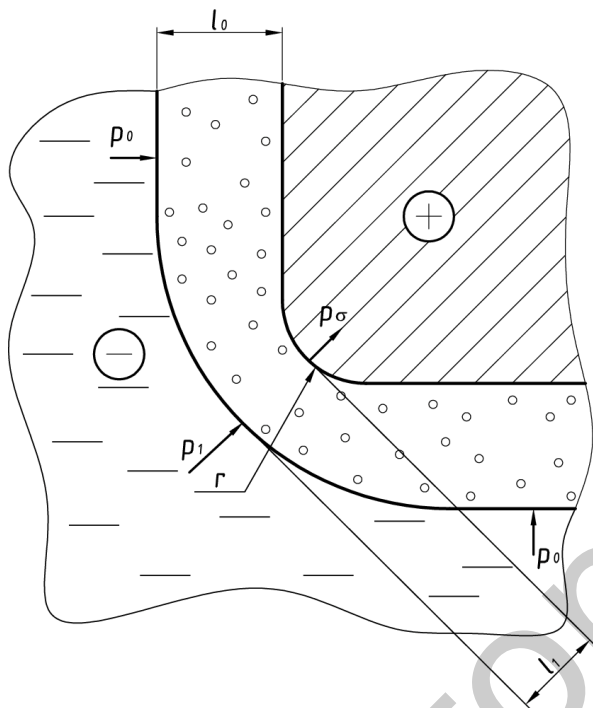


Рисунок 7 – Расчетная схема формирования парогазовой оболочки на прямолинейном и криволинейном участках поверхности

где k_v – объемный электрохимический эквивалент вещества, $\text{м}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$; η_a – коэффициент выхода по току; L – длина цилиндра, м ; j_0 – эквивалентная плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$; k – коэффициент плотности тока, $\text{А}/\text{м}$; σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$; U – рабочее напряжение, В ; ε – относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки; ε_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}/\text{м}$), r – радиус кривизны цилиндрической поверхности, м ; $r_{исх}$ – исходный радиус, м ; $r_{кон}$ – конечный радиус, м .

Расчеты скорости съема металла с помощью разработанной модели производились в следующих диапазонах параметров: температура электролита – от 60 до 90 °С, глубина погружения – от 5 до 125 мм, рабочее напряжение – от 240 до 300 В, радиус кривизны – от 0,2 до 1 мм. Установлено, что расчетные зависимости хорошо согласуются с полученными ранее экспериментальными зависимостями, что подтверждает достоверность модели в указанных диапазонах параметров.

Разработанная математическая модель позволяет выполнять расчеты текущей скорости съема $v_{цил}$

$$v_{цил} = 2\pi r L k_v \eta_a \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2 \sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}$$

и необходимой продолжительности обработки t с учетом изменения радиуса кривизны в процессе обработки

$$t = \frac{1}{k_v \eta_a} \int_{r_{кон}}^{r_{исх}} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2 \sigma}{U^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}},$$

где k_v – объемный электрохимический эквивалент вещества, $\text{м}^3/(\text{А} \cdot \text{мин})$; η_a – коэффициент выхода по току; L – длина цилиндра, м ; j_0 – эквивалентная плотность тока, $\text{А}/\text{м}^2$; k – коэффициент плотности тока, $\text{А}/\text{м}$; σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$; U – рабочее напряжение, В ; ε – относительная диэлектрическая проницаемость парогазовой оболочки; ε_0 – электрическая постоянная ($8,85 \cdot 10^{-5} \text{ Ф}/\text{м}$), r – радиус кривизны цилиндрической поверхности, м ; $r_{исх}$ – исходный радиус, м ; $r_{кон}$ – конечный радиус, м .

В результате планирования эксперимента установлено, что наиболее существенное влияние на скорость съема металла оказывает температура электролита, наименьшее влияние – глубина погружения, а максимальная скорость съема 9,5 мкм/мин достигается при температуре электролита 70 °С, глубине погружения 125 мм и рабочем напряжении 240 В.

В пятой главе приведены результаты разработки и практической реализации технологии и оборудования для изготовления сложнопрофильных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра.

На основании результатов выполненных исследований разработана технология получения волноводов, включающая два этапа: процесс изготовления заготовки волновода волочением с промежуточной ЭПО и процесс формообразования цилиндрических ступеней волновода и плавных переходов сложного профиля методом размерной ЭПО.

Процесс получения заготовки волновода волочением с промежуточной ЭПО включает семь проходов волочения с суммарным обжатием $\delta_{\text{сум.}} = 80\%$. Между проходами волочения проводится ЭПО продолжительностью 3 мин. На предложенный процесс получения заготовок волноводов получено решение о выдаче патента Республики Беларусь на полезную модель по заявке № и 20120500 от 16.05.2012 г. [23].

На основе метода размерной ЭПО разработан процесс формообразования цилиндрических ступеней волновода и плавных переходов сложного профиля. Преимуществами волноводов, полученных размерной ЭПО, являются: однородность характеристик материала по всей длине, соответствующих характеристикам исходной заготовки, поскольку ЭПО не оказывает силового и значимого температурного воздействия на материал; высокое качество поверхности; надежность рабочего наконечника за счет его формирования из цельной заготовки без дополнительной сварки или пайки. Новизна предложенного способа формообразования подтверждена евразийским патентом № 005704 от 28.04.2005 [21] и патентом на изобретение Республики Беларусь № 15730 от 30.04.2012 [22].

В результате эксплуатационных испытаний установлено, что прочностные и акустические характеристики волноводов, полученных по разработанной технологии, выше характеристик волноводов, полученных шлифованием: надежность выше на 31–53 %, максимальное значение амплитуды продольных колебаний выше на 40 %.

Разработанные процесс формообразования поверхностей ультразвуковых волноводов восьми типоразмеров методом размерной ЭПО ТП № ИШПЖ 000025.001 – № ИШПЖ 000025.008, процесс получения заготовки волновода волочением с промежуточной ЭПО ТП № ИШПЖ 000022.001, а также установка для формообразования поверхностей волноводов методом размерной ЭПО КД № ИШПЖ 15.00.00.000 внедрены на Государственном

предприятия «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» для изготовления сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра.

Разработаны технические условия ТУ ВУ 100232486.013–2007 на изделие «Инструменты-волноводы для ультразвуковой ангиопластики». По результатам государственных испытаний установлено, что волноводы по санитарно-гигиеническим и техническим характеристикам соответствуют требованиям нормативных актов, действующих в отношении медицинских инструментов. На основании положительных результатов медицинских испытаний получено регистрационное удостоверение № ИМ-7.93118/1003, разрешающее производство волноводов и их применение в медицинской практике.

Экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 347,86 млн. руб./год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Результаты экспериментальных исследований и анализа методов получения длинномерных изделий малого диаметра продольной прокаткой, шлифованием, волочением, электрохимической размерной обработкой и электролитно-плазменной обработкой показали, что с учетом требований, предъявляемых к структуре и свойствам материала, наиболее приемлемым методом формообразования волноводов является размерная электролитно-плазменная обработка, обеспечивающая сохранение исходной структуры и свойств, равномерность механических характеристик по длине изделия и высокое качество поверхности, позволяющая формировать рабочий наконечник волноводов без дополнительной сварки или пайки. С учетом особенностей процесса размерной электролитно-плазменной обработки и условий эксплуатации разработана конструкция волноводов в виде ступенчатого стержня с диаметром проксимальной части 1,8–1,5 мм, диаметром дистальной части 0,5–1,0 мм, с плавными переходами между ступенями по типу концентратора Фурье, позволяющая усиливать амплитуду продольных колебаний в 2,5–3 раза [9, 10, 21, 22].

2. В результате экспериментальных исследований структуры и свойств поверхностного слоя цилиндрической заготовки, полученной волочением с последующей электролитно-плазменной обработкой продолжительностью от 1 до 10 мин, установлено, что применение электролитно-плазменной обработки между проходами волочения обеспечивает снижение величины растягивающих остаточных напряжений с 1080 до 770 МПа в поверхностном слое образца за счет снижения плотности дислокаций с $1,52 \cdot 10^{10}$ до $0,77 \cdot 10^{10}$ см⁻², удаления инородных включений и продуктов износа инструмента, снижения микротвердости с 4100 до 2500 МПа, сглаживания и удаления продольных складок и

уменьшения шероховатости поверхности, приводящего к снижению коэффициента трения при последующих проходах волочения. При этом наиболее существенное снижение растягивающих остаточных напряжений происходит в результате промежуточной электролитно-плазменной обработки продолжительностью до 3 мин [1, 3, 4, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 16, 19].

3. В результате экспериментальных исследований влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе получения заготовки волновода волочением на прочностные и акустические характеристики материала установлено, что промежуточная электролитно-плазменная обработка продолжительностью 3 мин, обеспечивает наиболее приемлемое сочетание высокой прочности (1480 МПа) и низких растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое (880 МПа), а также повышение предела выносливости материала заготовки на 21 % за счет снижения растягивающих остаточных напряжений и повышение интенсивности передаваемого ультразвука на 22–24 % за счет снижения плотности дислокаций, количества дефектов и инородных включений, которые являются причиной затухания колебаний [3, 6, 19, 23].

4. В результате экспериментальных исследований закономерностей влияния параметров электролитно-плазменной обработки (температуры электролита, рабочего напряжения, глубины погружения) и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности на скорость съема металла, установлено, что размерная электролитно-плазменная обработка цилиндрических длинномерных поверхностей малого диаметра из стали 12X18H9 может выполняться в следующих диапазонах параметров: температура электролита 70–95 °С, рабочее напряжение 240–300 В, глубина погружения 5–125 мм, а изменение скорости съема металла при различных значениях параметров электролитно-плазменной обработки связано с изменением плотности тока, причем зависимость скорости съема от плотности тока при электролитно-плазменной обработке имеет линейный характер.

Установлено, что наиболее существенное влияние на скорость съема металла, оказывает температура электролита, наименьшее влияние – глубина погружения, а максимальная скорость съема металла 9,5 мкм/мин (для заготовки диаметром 1,8 мм) достигается при температуре электролита 70 °С, глубине погружения 125 мм и рабочем напряжении 240 В [2, 11, 17, 18, 20].

5. В результате анализа и экспериментальной проверки предложенной математической модели процесса формообразования поверхностей малого диаметра в процессе электролитно-плазменной обработки, учитывающей связь скорости съема металла и плотности тока с температурой электролита, рабочим напряжением и глубиной погружения, и позволяющей выполнять расчет текущей скорости съема металла и необходимой продолжительности с учетом изменения радиуса кривизны в процессе обработки, установлено, что зависимость

плотности тока от радиуса кривизны носит гиперболический характер. При температуре электролита 80 °С, глубине погружения 20 мм и рабочем напряжении 300 В уменьшение радиуса кривизны обрабатываемой поверхности с 3 мм до 0,25 мм приводит к повышению плотности тока с 0,26 А/см² до 0,69 А/см² и, соответственно, к повышению скорости съема металла с 3,9 мкм/мин до 10,4 мкм/мин [5, 15].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработана технология получения волноводов, включающая процесс изготовления заготовки волновода волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой и процесс формообразования цилиндрических ступеней волновода и плавных переходов сложного профиля методом размерной электролитно-плазменной обработки. Процессы формообразования поверхностей ультразвуковых волноводов восьми типоразмеров методом размерной электролитно-плазменной обработки ТП № ИШПЖ 000025.001 – № ИШПЖ 000025.008, процесс получения заготовки волновода волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой ТП № ИШПЖ 000022.001, а также установка для формообразования поверхностей волноводов методом размерной электролитно-плазменной обработки КД № ИШПЖ 15.00.00.000 внедрены на Государственном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» для изготовления сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра. Разработанные процессы защищены евразийским патентом, патентом Республики Беларусь и решением о выдаче патента Республики Беларусь [21, 22, 23].

Разработаны технические условия ТУ ВУ 100232486.013–2007 на изделие «Инструменты-волноводы для ультразвуковой ангиопластики». На основании положительных результатов технических, санитарно-гигиенических и медицинских испытаний получено регистрационное удостоверение № ИМ-7.93118/1003, разрешающее производство волноводов и их применение в медицинской практике.

Экономический эффект от внедрения разработанной технологии составляет 347,86 млн. руб./год.

2. Разработанная математическая модель формообразования поверхностей малого диаметра позволяет выполнять расчеты при создании технологических процессов формообразования точных деталей вращения методом размерной электролитно-плазменной обработки.

3. Разработанный процесс волочения с промежуточной электролитно-плазменной обработкой может быть использован для производства заготовок ответственных изделий медицинского назначения, работающих при высоких знакопеременных нагрузках.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научных журналах

1. Алексеев, Ю.Г. Комплексная технология изготовления изделий медицинской техники, основанная на пластическом деформировании и физико-технических методах / Ю.Г. Алексеев, В.Н. Страх, А.Ю. Королёв // *Литье и металлургия*. – 2005. – №4. – С. 180–187.

2. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс, Д.В. Кучерявый, А.А. Повжик // *Литье и металлургия*. – 2005. – №4. – С. 188–195.

3. Исаевич, Л.А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12Х18Н10Т волочением с электролитно-плазменной обработкой поверхности / Л.А. Исаевич, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв // *Вестник БНТУ*. – 2005. – №6. – С. 30–33.

4. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс // *Вестні Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2008. – №3. – С. 24–29.

5. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, А.Э. Паршутто, В.С. Нисс // *Наука и техника*. – 2012. – №3. – С. 3–6.

6. Исследование влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением / Ю.Г. Алексеев, Л.А. Исаевич, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс // *Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки*. – 2012. – №3. – С. 85–90.

Статьи в сборниках научных трудов

7. Изменение структуры поверхностного слоя нержавеющей стали при электролитно-плазменной обработке / А.Ю. Королёв, И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Н.Н. Галеева // *Порошковая металлургия. Респ. межвед. сб. науч. тр. / Ин-т порошковой металлургии. Минск, 2007. – Вып. 30. – С. 270–276.*

8. Исследование влияния равномерности полировки различных зон сложной поверхности изделия в зависимости от глубины погружения, пространственной ориентации и скорости гидротоков при электролитно-плазменной обработке / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс // *Сварка и родственные технологии : республиканский межведомст-*

венный сборник научных трудов / Белорус. гос. науч.-произв. концерн порошковой металлургии, Ин-т порошковой металлургии. – № 10 / редкол. : Г.Н. Здор (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2008. – С. 37–42.

Материалы конференций

9. Королёв, А.Ю. Исследование методов изготовления ультразвукового воновода-излучателя / А.Ю. Королёв, // V Республиканская научная конференция студентов, магистрантов и аспирантов Республики Беларусь (НИРС-2000) : материалы конференции, Гродно, 25-27 апреля 2000 г. : в 5 ч. / Гродненск. госуд. ун-т; редкол. : С.А. Маскевич [и др.]. – Гродно, 2000. – Ч.5. – С. 350–353.

10. Степаненко, А.В. Разработка и исследование продольной прокатки круглых конических профилей / А.В. Степаненко, А.Ю. Королёв, А.Н. Бусел // Прогрессивные технологии обработки материалов давлением : материалы международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения академика АН БССР В.П. Северденко, Минск, 18-22 мая 2004 г. : в 2 ч. / Белорус. нац. техн. ун-т; редкол. : А.В. Степаненко [и др.]. – Минск, 2004. – Ч.1. – С. 38–42.

11. Электролитно-плазменная обработка: особенности формирования парогазовой оболочки и ее влияние на съем материала при обработке поверхностей металлических изделий / Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс, Д.В. Кучерявый, А.А. Повжик // Порошковая металлургия : достижения и проблемы : сборник материалов докладов Междунар. научно-техн. конф., Минск, 22-23 сент. 2005 г. / Ин-т порошковой металлургии; редкол. : Н.И. Пирожник [и др.]. – Минск, 2005. – С. 236–245.

12. Влияние электролитно-плазменной обработки на изменение характеристик поверхностного слоя коррозионностойких аустенитных сталей / А.Ю. Королёв, Ю.Г. Алексеев, А.А. Кособуцкий, И.В. Фомихина, А.А. Повжик // Инженерия поверхности : сборн. научн. статей междунар. научно-техн. конф., 27-27 окт. 2007 г. / Брест. гос. техн. ун-т; редкол. : В.М. Хвисевич [и др.]. – Брест, 2007. – С. 77–81.

13. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхности / И.В. Фомихина, Ю.О. Лисовская, Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс // Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка : сборн. докл. междунар. симпоз., Минск, 25-27 марта 2009 г. : в 2 ч. / Белорус. гос. науч.-произв. концерн порошковой металлургии, Ин-т порошковой металлургии; редкол. : П.А. Витязь [и др.] – Минск, 2009. – Ч.2. – С. 158–165.

14. Изменение структуры модифицированного слоя нержавеющей стали при электролитно-плазменной обработке / И.В. Фомихина, Ю.Г. Алексеев, В.С. Нисс, А.Ю. Королёв // Инженерия поверхностного слоя деталей машин : сб. материалов II Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 27-28 мая 2010 г. / редкол. : Б.М. Хрусталеv, [и др.]. – Минск : БНТУ, 2010. – 269, С. 226–232.

15. Экспериментально-расчетная модель размерной электролитно-плазменной обработки цилиндрических поверхностей / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королёв, А.Э. Паршуто, В.С. Нисс // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : материалы VI конференции Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19-21 сент. 2012 г. Кн. 2. Высокоэнергетические технологии получения и обработки материалов. Технологии и оборудование инженерии поверхности / Минск. ФТИ НАН Беларуси / ред. коллегия : С.А. Астапчик (гл. ред.). – Минск : ФТИ НАН Беларуси, – 2012. – С. 144–151.

Тезисы докладов

16. Aliakseyeu, Y.G. Electrolite-plasma treatment of metal materials surfaces / Y.G. Aliakseyeu, A.Y. Korolyov, A.V. Bezyazychnaya // CO-MAT-TECH 2006 : Proceeding of the abstracts of 14-th International Scientific Conference, Slovak University of Technology, 19-20 October 2006, – Slovakia, Trnava, – P. 6.

17. Экспериментальные исследования и оптимизация технологических параметров размерной электролитно-плазменной обработки / В.С. Нисс, Ю.Г. Алексеев, А.Э. Паршуто, А.Ю. Королёв // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении : сб. материалов междунар. науч.-практ. конф., Минск, 11 апреля 2012 г. – Минск : БНТУ, 2012. – С. 51–52.

18. Королёв, А.Ю. Оптимизация технологических параметров размерной электролитно-плазменной обработки / А.Ю. Королёв, Ю.Г. Алексеев, В.С. Нисс // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : материалы междунар. науч.-техн. конф., Могилёв, 19-20 апр. 2012 г. : в 2 ч. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Могилев. обл. исполн. ком., Нац. акад. наук Респ. Беларусь, Белорус.-Рос. ун-т; редкол. : И.С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. : – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2012. – Ч.1. – С. 136–137.

19. Алексеев, Ю.Г. Деформационное упрочнение заготовок волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой / Ю.Г. Алексеев, А.Ю. Королев // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 10-й Международной научно-технической конференции, Минск, 2012 г. : в 4 т. / редкол. : Б.М. Хрусталеv (гл. ред.) [и др.] Минск : БНТУ, 2012. – Ч.1. – С. 345.

20. Королев, А.Ю. Влияние технологических параметров размерной электролитно-плазменной обработки на скорость съема / А.Ю. Королев, С.И. Головач // Наука – образованию, производству, экономике : материалы 10-й Международной научно-технической конференции, Минск, 2012 г. : в 4 т. / редкол. : Б.М. Хрусталева (гл. ред.) [и др.] Минск : БНТУ, 2012. – Ч.1. – С. 340.

Патенты

21. Волновод для внутрисосудистой тромбэктомии тромбов и тромбозов и метод его изготовления : пат. 005704 ЕАПО, МПК А61В 17/22, 17/32 ; С25F 3/16 / А.Г. Мрочек, И.Э. Адзериho, Ю.Г. Алексеев, В.Т. Минченя, В.Н. Страх, А.Ю. Королев ; заявитель УП «Технопарк БНТУ «Метолит». – № а 20030052 ; заявл. 2003.01.24 ; опубл. 2005.02.09 // Офиц. бюл. / Евраз. пат. организ. – 2005. – № 1. – С. 145.

22. Способ электролитно-плазменной обработки длинномерного изделия : пат. 15730 Респ. Беларусь, МПК (2006) С25F 3/16 / А.А. Кособуцкий, Ю.Г. Алексеев, В.С. Нисс, В.Т. Минченя, А.Ю. Королев, А.Э. Паршутто, Ю.А. Бумай; заявитель Респ. инновац. ун-е пр-е «Научно-технологич. парк БНТУ «Политехник». – № а 20091041 ; заявл. 2009.07.10 ; опубл. 2012.04.30 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2012. – № 2. – С. 122.

Заявки на патенты

23. Технологическая линия для изготовления заготовки волновода для внутрисосудистой тромбэктомии тромбов и тромбозов : Решение о выдаче патента Респ. Беларусь, В 21В 9/00, С25F 3/16 / Ю.Г. Алексеев, Л.А. Исаевич, В.К. Шелег, А.Ю. Королёв, В.С. Нисс, А.Э. Паршутто; заявитель Респ. инновац. ун-е пр-е «Научно-технологич. парк БНТУ «Политехник». – № и 20120500 ; заявл. 2012.05.16.

РЭЗЬЮМЭ

Каралёў Аляксандр Юр'евіч

ТЭХНАЛОГІЯ АТРЫМАННЯ СКЛАДАНАПРОФІЛЬНЫХ ДАЎГАМЕРНЫХ УЛЬТРАГУКАВЫХ МЕДЫЦЫНСКІХ ХВАЛЯВОДАЎ МАЛОГА ДЫЯМЕТРУ ЭЛЕКТРАЛІТНА-ПЛАЗМЕННАЙ АПРАЦОЎКАЙ

Ключавыя словы: ультрагукавы хвалявод, трываласныя характарыстыкі, акустычныя характарыстыкі, валачэнне, электралітна-плазменная апрацоўка, парагазавая абалонка, здым металу, формаўтварэнне.

Мэта працы – распрацоўка тэхналогіі атрымання складанапрофільных даўгамерных ультрагукавых медыцынскіх хваляводаў малога дыяметру электралітна-плазменнай апрацоўкай, якая забяспечвае высокія трываласныя і акустычныя характарыстыкі матэрыялу для надзейнай работы ў агрэсіўным асяроддзі ва ўмовах высокіх знакапераменных напружанняў.

Метады даследавання: рэнтгенаструктурны аналіз, электронна-мікраскапічныя даследаванні, метады статыстычнай апрацоўкі дадзеных, метады матэматычнага мадэлявання, мікрамеханічныя даследаванні, даследаванні рэшткавых напружанняў метадам замеры прагібаў.

Атрыманыя вынікі. Упершыню ўстаноўлена, што ў выніку прымянення электралітна-плазменнай апрацоўкі паміж праходамі валачэння адбываецца павышэнне мяжы трываласці матэрыялу на 21% і павышэнне інтэнсіўнасці перадаецца матэрыялам ультрагуку на 20–24%.

Прапанавана матэматычная мадэль формаўтварэння паверхняў малога дыяметру ў працэсе электралітна-плазменнай апрацоўкі, якая характарызуе ўплыў тэхналагічных параметраў і радыусу крывізны апрацоўваемай паверхні на шчыльнасць рабочага току і якая дазваляе разлічыць бягучую хуткасць здыму металу і неабходную працягласць апрацоўкі з улікам змянення радыусу крывізны ў працэсе апрацоўкі.

Распрацавана тэхналогія атрымання складанапрофільных даўгамерных ультрагукавых медыцынскіх хваляводаў малога дыяметру, якая ўключае працэс вырабу загатоўкі валачэннем з прамежкавай электралітна-плазменнай апрацоўкай паміж праходамі для выдалення ўтвараемых у выніку валачэння дэфектных паверхневых слаёў, а таксама працэс формаўтварэння цыліндрычных ступеняў хвалявода і плаўных пераходаў складанага профілю метадам размернай электралітна-плазменнай апрацоўкі.

Ступень выкарыстання: вынікі працы ўкаранены на Дзяржаўным прадпрыемстве «Навукова-тэхналагічны парк БНТУ «Палітэхнік». Эканамічны эффект ад укаранення складае 347,86 млн. руб./год.

РЕЗЮМЕ

Королёв Александр Юрьевич

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЛИННОМЕРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ВОЛНОВОДОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Ключевые слова: ультразвуковой волновод, прочностные характеристики, акустические характеристики, волочение, электролитно-плазменная обработка, парогазовая оболочка, съём металла, формообразование.

Цель работы – разработка технологии получения сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра электролитно-плазменной обработкой, обеспечивающей высокие прочностные и акустические характеристики материала для надёжной работы в агрессивной среде в условиях высоких знакопеременных напряжений.

Методы исследования: рентгеноструктурный анализ, электронномикроскопические исследования, метод статистической обработки данных, метод математического моделирования, микромеханические исследования, исследование остаточных напряжений методом замера прогибов.

Полученные результаты. Впервые установлено, что в результате применения электролитно-плазменной обработки между проходами волочения происходит повышение предела выносливости материала на 21 % и повышение интенсивности передаваемого материалом ультразвука на 20–24%.

Предложена математическая модель формообразования поверхностей малого диаметра в процессе электролитно-плазменной обработки, характеризующая влияние технологических параметров и радиуса кривизны обрабатываемой поверхности на плотность рабочего тока и позволяющая рассчитать текущую скорость съёма металла и необходимую продолжительность обработки с учетом изменения радиуса кривизны в процессе обработки.

Разработана технология получения сложнопрофильных длинномерных ультразвуковых медицинских волноводов малого диаметра, включающая процесс изготовления заготовки волочением с промежуточной электролитно-плазменной обработкой между проходами, выполняемой с целью удаления образующихся при волочении дефектных поверхностных слоев, а также процесс формообразования цилиндрических ступеней волновода и плавных переходов сложного профиля методом размерной электролитно-плазменной обработки.

Степень использования: результаты работы внедрены на Государственном предприятии «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник». Экономический эффект от внедрения составляет 347,86 млн. руб./год.

SUMMARY

Korolyov Aleksandr Yur'evich

TECHNOLOGY FOR OBTAINING COMPLEX-SHAPE LONG-DIMENSIONAL SMALL DIAMETER ULTRASOUND MEDICAL WAVEGUIDES BY ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT

Keywords: ultrasound waveguide, strength characteristics, acoustic characteristics, drawing, electrolyte-plasma treatment, steam-gas shell, metal removal, forming.

Aim of work – to develop technology for obtaining complex-shape long-dimensional small diameter ultrasound medical waveguides by electrolyte-plasma treatment providing high strength and acoustic characteristics of the material for reliable work in corrosive environments at high alternating stresses.

Investigation methods: X-ray diffraction analysis, electron microscopic investigations, statistical treatment, the method of mathematical modeling, micromechanical investigations, investigations of residual stresses by measuring the deflections.

Results obtained. For the first time established that the application of electrolyte-plasma treatment between passes of drawing process increases by 21% the fatigue strength of the material and increases by 20–24% the intensity of ultrasound transmitted by material.

The mathematical model of shaping the small diameter surfaces in the electrolyte-plasma treatment was proposed. The model characterizes the effects of process parameters and the radius of curvature of the workpiece at the operating current density and allows to calculate the current metal removal rate and the required treatment time taking into account the of radius of curvature change in the treatment.

The technology for obtaining complex-shape long-dimensional small diameter ultrasound medical waveguides has been developed. The technology includes the process of production of workpiece by drawing with intermediate electrolyte-plasma treatment between passes which removes defective surface layers formed by drawing and the process of forming cylindrical surfaces and complex profile smooth transitions between the stages of waveguide by dimensional electrolyte-plasma treatment.

Degree of practical usefulness: Results of work have been implemented at the State Enterprise “Scientific and Technological Park of BNTU “Polytechnic”. Economic effect of implementation is 347.86 mln. rub./year.

Научное издание

КОРОЛЁВ Александр Юрьевич

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЛИННОМЕРНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ВОЛНОВОДОВ МАЛОГО ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ

Автореферат

диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Подписано в печать . Формат 60×84¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 1,28. Уч.-изд. л. 1,00. Тираж 60. Заказ.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет. ЛИ № 02330/0494349 от 16.03.2009. Пр. Независимости, 65, 220013, Минск.