

Пластическое деформирование и электрофизикохимическая обработка трубчатых медицинских концентраторов-волноводов

Асп. Дай Вэньци¹⁾,
кандидаты техн. наук, доценты Ю. Г. Алексеев¹⁾, А. Ю. Королёв¹⁾,
асп. А. С. Будницкий¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2020
Belarusian National Technical University, 2020

Реферат. Ультразвуковые методы устранения непроходимости сосудов получили широкое распространение во всем мире. Преимущества – отсутствие оперативного вмешательства, низкая вероятность осложнений и стоимость лечения. Ультразвуковые волноводные системы для разрушения внутрисосудистых образований и устранения непроходимости сосуда изготавливаются в виде полых или сплошных длинномерных стержней постоянного и переменного сечений (концентраторов-волноводов). Ведутся разработки новых методик лечения, основанных на применении ступенчатых ультразвуковых волноводных систем трубчатого типа, позволяющих подавать жидкости в зону дислокации внутрисосудистого образования. Наличие в дистальной части таких волноводных систем полого сферического наконечника с осевым и боковыми микроотверстиями, предназначенными для воздействия образующейся кавитационной струей как на внутрисосудистое образование, так и на пораженный участок сосудистой стенки, позволяет восстанавливать проходимость сосуда с одновременным повышением эластичности сосудистой стенки. Такое комбинированное виброударное и кавитационное воздействие является в настоящее время одним из наиболее эффективных методов лечения внутрисосудистых образований. Анализ размеров, конструкций и материалов для изготовления трубчатых концентраторов-волноводов показывает, что их формообразование возможно проводить различными методами: холодного деформирования, механической, гидроабразивной обработки, с использованием сварочных (или родственных процессов), электролитических, а также комбинированных методов обработки. Существующие процессы получения длинномерных изделий малого диаметра, основанные на пластических методах, механической обработке и физико-технических методах, имеют ряд недостатков, не позволяющих изготавливать трубчатые концентраторы-волноводы с требуемыми характеристиками. В статье представлены результаты анализа литературных источников, а также выполненных экспериментальных исследований, которые позволили обосновать выбор методов поэтапного изготовления трубчатых концентраторов-волноводов: получение трубчатого ступенчатого элемента безоправочным волочением, получение рабочего наконечника раздачей и обжимом, получение боковых отверстий в рабочем наконечнике электрохимической прошивкой.

Ключевые слова: трубчатый концентратор-волновод, внутрисосудистые образования, сферический наконечник, микроотверстие, волочение, электрохимическая прошивка

Для цитирования: Пластическое деформирование и электрофизикохимическая обработка трубчатых медицинских концентраторов-волноводов / Дай Вэньци [и др.] // *Наука и техника*. 2020. Т. 19, № 6. С. 499–506. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-499-506>

Plastic Deformation and Electrophysicochemical Treatment of Tubular Medical Concentrator Waveguides

Dai Wenqi¹⁾, Yu. G. Aliakseyeu¹⁾, A. Yu. Korolyov¹⁾, A. S. Budnitskiy¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Ultrasonic methods for eliminating vascular obstruction are widespread throughout the world. The advantages of such methods are the absence of surgical intervention, a low probability of complications, and a low cost of treatment. Ultrasonic waveguide systems for the destruction of intravascular formations and elimination of vessel obstruction are made in the form of hollow or continuous long rods of constant and variable cross-section (concentrator waveguides). The development of new methods of treatment based on the use of stepped ultrasonic waveguide systems of a tubular type is underway,

Адрес для переписки

Будницкий Алексей Сергеевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

Address for correspondence

Budnitskiy Alexey S.
Belarusian National Technical University
24, Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-76-78
budnitskiy@park.bntu.by

allowing to supply fluids to the zone of dislocation of an intravascular formation. The presence of a hollow spherical tip with axial and lateral micro-holes in the distal part of such waveguide systems, designed to influence the resulting cavitation jet, both on the intravascular mass and on the affected area of the vascular wall, allows the vessel to be restored with a simultaneous increase in the elasticity of the vascular wall. Such a combined vibration and shock and cavitation effect is currently one of the most effective methods of treating intravascular formations. An analysis of the sizes, structures and materials for the manufacture of tubular concentrator waveguides shows that their shaping can be carried out by various methods: cold deformation, mechanical, hydroabrasive treatment, using welding (or related processes), electrolytic, and also combined processing methods. The existing processes for obtaining long products of small diameter, based on plastic methods, mechanical processing and physical and technical methods, have a number of disadvantages that do not allow the manufacture of tubular concentrator waveguides with the required characteristics. The paper presents the results of the analysis of literary sources, as well as the results of experimental studies, which have made it possible to substantiate the choice of methods for the step-by-step manufacture of tubular concentrator waveguides: obtaining a tubular stepped element by unrestricted drawing, obtaining a working tip by distributing and crimping, obtaining side holes in the working tip by electrochemical cutting.

Keywords: tubular concentrator waveguide, intravascular formations, spherical tip, micro-hole, drawing, electrochemical cutting

For citation: Wenqi Dai, Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Budnitskiy A. S. (2020) Plastic Deformation and Electrophysicochemical Treatment of Tubular Medical Concentrator Waveguides. *Science and Technique*. 19 (6), 499–506. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2020-19-6-499-506> (in Russian)

Введение

Применение комбинированных способов деформирования и электрофизической обработки длинномерных трубных заготовок сложной геометрии открывает широкие возможности создания новых видов продукции, чрезвычайно востребованных в таких областях, как точное приборостроение и медицинская промышленность. Особенно актуальными являются разработка и создание изделий медицинского назначения для лечения сердечно-сосудистых заболеваний. Так, для лечения атеросклеротических заболеваний предложены метод и оборудование для ультразвуковой ангиопластики, разработанные в БНТУ совместно с кардиологами РНПЦ «Кардиология» и БелМАПО. В основе метода лежит разрушение атеросклеротических образований низкочастотным высокоинтенсивным ультразвуком [1], которое достигается за счет механического и кавитационного внутрисосудистого воздействия с помощью гибкого волновода диаметром 0,5–1,8 мм и длиной до 1200 мм, излучающего комбинированные колебания с частотой 22–28 кГц [1]. С целью усовершенствования конструкции волноводно-катетерной системы предложено использовать ступенчатый концентратор-волновод трубчатого типа [1].

Исследования методов ультразвуковой ангиопластики и создание ультразвуковых волноводных систем в настоящее время проводятся также в США, Испании, Хорватии и Ирландии [2–5]. Конструктивно ультразвуковые волноводные системы могут выполняться в виде полых или сплошных длинномерных стержней постоянного и переменного сечений (концентраторов-волноводов) [1, 4]. Ведутся разработ-

ки новых методик лечения, основанных на применении волноводных систем трубчатого типа, позволяющих подавать жидкости в зону дислокации внутрисосудистого образования [5]. Однако существующие процессы получения длинномерных изделий малого диаметра, основанные на пластических методах, механической обработке и физико-технических методах, имеют ряд недостатков, не позволяющих изготавливать трубчатые концентраторы-волноводы с требуемыми характеристиками.

В этой связи актуальными как в научном, так и в практическом плане являются научные труды, направленные на разработку и исследование процессов получения ультразвуковых волноводных систем трубчатого типа переменного сечения для внутрисосудистого ультразвукового воздействия с применением физико-технических методов и методов пластического деформирования.

Обзор методов пластического деформирования и электрофизикохимической обработки

Одним из наиболее эффективных методов лечения внутрисосудистых образований в настоящее время является применение ступенчатых ультразвуковых волноводных систем трубчатого типа (трубчатых концентраторов-волноводов) с полым сферическим наконечником, наличие которого позволяет обеспечить возможность подачи жидких сред в зону дислокации внутрисосудистого образования с целью дополнительного кавитационного воздействия и максимально эффективного разрушения внутрисосудистых образований за счет виброударного воздействия (рис. 1) [5, 6].

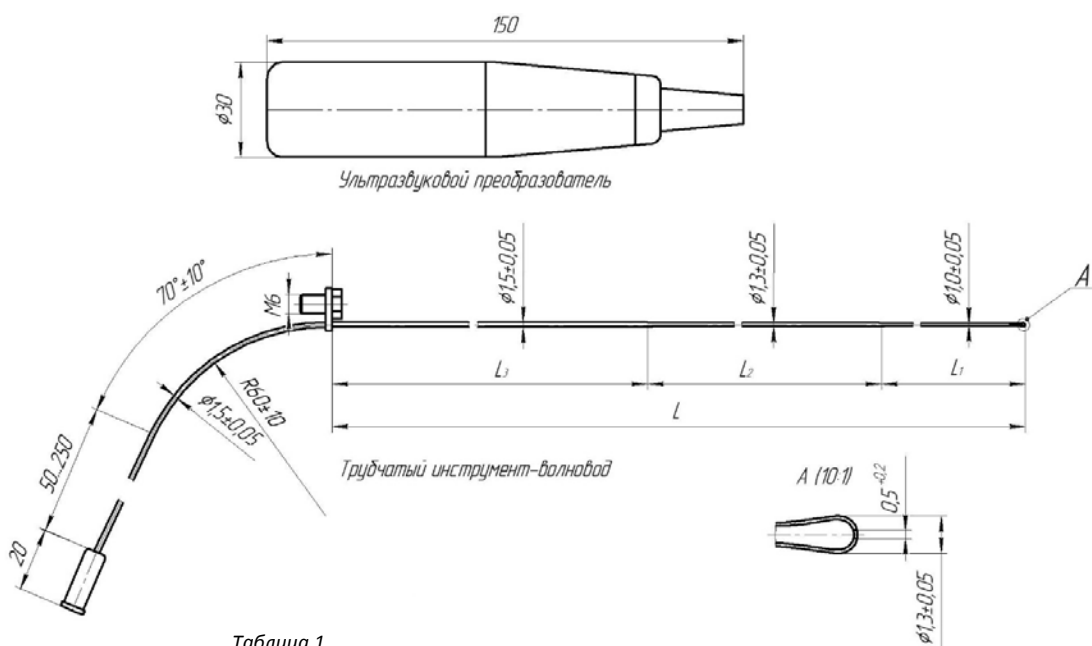


Таблица 1
Размеры трубчатого инструмента-волновода*

	L , мм	L_1 , мм	L_2 , мм	L_3 , мм
Исполнение 1	635	66	167	402
Исполнение 2	810	203	305	302
Допуск	±5	±3	±3	±3

*Размер определяется при акустической настройке трубчатого инструмента-волновода

Рис. 1. Геометрические параметры трубчатого концентратора-волновода со сферическим наконечником

Fig. 1. Geometrical parameters of a tubular concentrator waveguide with a spherical tip

В сферическом наконечнике имеются осевое ($(0,50 \pm 0,05)$ мм) и боковые ($(0,30 \pm 0,05)$ мм) микроотверстия, предназначенные для воздействия образующейся кавитационной струей как на внутрисосудистое образование, так и на пораженный участок сосудистой стенки, что позволяет восстанавливать проходимость сосуда с одновременным повышением эластичности сосудистой стенки (рис. 2) [5]. Трубчатые концентраторы-волноводы медицинского назначения могут быть изготовлены из коррозионно-стойкой стали (типа 12X18Н10, или могут быть использованы ее аналоги).



Рис. 2. Сферический наконечник трубчатого концентратора-волновода

Fig. 2. Spherical tip of a tubular concentrator waveguide

Анализ размеров, конструкций и материалов для изготовления трубчатых концентраторов-волноводов показывает, что их формообразование возможно проводить различными методами: холодного деформирования, механической, гидроабразивной обработки, с использованием сварочных (или родственных процессов), электролитических, а также комбинированных методов обработки. С целью выбора оптимального технологического процесса изготовления трубчатых концентраторов-волноводов рассмотрим и проанализируем различные методы формообразования рабочих поверхностей данного изделия.

Волочение широко применяется для изготовления трубчатых изделий малого диаметра. При необходимости волочением можно добиться получения ступенчатого профиля готового изделия с различными размерами поперечного сечения. Это достигается использованием волок соответствующих диаметров с протягиванием на необходимую длину. В [7] исследован метод формообразования стержневого ступенчатого ультразвукового волновода из коррози-

онностойкой стали 12Х18Н9 с диаметрами ступеней 2,0, 1,0 и 0,5 мм многократным волочением путем поэтапного протягивания заготовки через волокна. Недостатком волочения является небольшая степень деформации заготовки, которая ограничивается пределом прочности выходящего из волокна конца заготовки, к которому прилагается требуемое для деформирования усилие. Поэтому для практической реализации метода [7] требуется изготовление большого количества волокон (18 шт.).

Известна также технологическая схема одновременной *свертки с волочением ленты* через одну или несколько волокон [8], которая включает свертку листовой заготовки с ее последующим волочением.

Для изготовления длинномерных трубчатых концентраторов-волноводов могут быть использованы *методы сварочных процессов*, применяемые для получения медицинских игл. В [9] описывается способ дуговой сварки особо тонкостенных (капилляров) труб малого диаметра (4 мм и менее) с толщиной стенки 0,1–0,2 мм для изготовления медицинских игл разного применения. При этом главным требованием к сварному шву является его формирование заподлицо с основным материалом при применении высоких скоростей сварки (200 м/ч и более). Этот метод эффективен при изготовлении трубок малого диаметра с большой протяженностью, но не применим в случае необходимости получения ступенчатых переходов и ступеней переменного поперечного сечения.

Магнито-абразивная обработка является одним из передовых процессов обработки поверхности заготовки, который обеспечивает высокий уровень качества поверхности (шероховатость нанометрового диапазона) и в основном контролируется параметрами магнитного поля. Заготовка располагается между двумя полюсами магнита, а зазор между заготовкой и магнитом заполнен магнитными абразивными частицами [10, 11]. Такой метод эффективен при механической обработке трубчатых изделий малого сечения и доводке их до необходимого размера. Однако в связи с тем, что снимаемый слой во время магнито-абразивной

обработки небольшой, получение размерных ступенчатых переходов диаметра готового изделия с помощью данного метода затруднительно и нецелесообразно.

Электролитические методы реализуются путем электрохимической (электролитической) обработки заготовки, при которой формирование необходимого размера изделия достигается путем равномерного удаления материала.

Электрохимическое полирование (ЭХП). ЭХП поверхности металлов и сплавов в настоящее время является одним из наиболее широко применяемых методов повышения качества поверхности изделий [12]. Основным механизмом сглаживания поверхности при ЭХП считается интенсивное растворение металла на вершинах микронеровностей вследствие их наибольшей поляризации [13]. Недостаток ЭХП – использование вредных, в ряде случаев токсичных электролитов, основанных на кислотах.

Применять дешевые и экологически чистые электролиты с относительно легкой автоматизацией в условиях любого производства позволяет использование *электролитно-плазменной обработки (ЭПО)* [14]. Метод ЭПО в основном применяется для очистки поверхности, удаления заусенцев, скругления острых кромок. Обработку проводят при температуре электролита (75–90) °С. Продолжительность обработки обычно составляет 3–5 мин [15]. При этом достигаются яркий металлический блеск, высокая чистота и гляцевание поверхности, снятие заусенцев, качественная подготовка и модификация поверхности для последующего нанесения разнообразных покрытий [15]. В [16] отмечается, что производительность и экономическая эффективность технологических операций при ЭПО в пять-шесть раз больше, чем при электрохимическом способе полирования в растворах кислот.

В [1] используется способ ЭПО для формирования различных по диаметру ступеней стержневого концентратора-волновода (рис. 3) для внутрисосудистой тромбэктомии и переходов между ними.

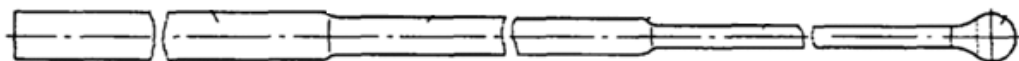


Рис. 3. Схема стержневого ступенчатого концентратора-волновода для внутрисосудистой тромбэктомии

Fig. 3. Diagram of a rod stepped concentrator waveguide for intravascular thromboectomy

Заготовку помещают в электролит под углом от 0 до 90° по отношению к поверхности электролита, после чего заготовке задают вращение вокруг продольной оси с частотой до 30 об./мин на время достижения заданного диаметра той части волновода, которая погружена в электролит, а для создания перехода по типу концентратора Фурье осуществляют ее перемещение из электролита вдоль продольной оси. Причем на меньший диаметр заготовку перемещают из электролита вдоль ее продольной оси с шагом перемещения 1 мм по горизонтали согласно значениям величины перемещения и получаемого диаметра.

Установлено [17], что ЭПО стали 08X18H10T обеспечивает повышение потенциала питтингообразования (коррозионной стойкости поверхностного слоя) по сравнению с механическим полированием. Многофункциональность рассмотренного способа доказывает его эффективность. Обработка внешней поверхности и формирование ступенчатого продольного профиля готового изделия ограничиваются лишь прочностью обрабатываемой заготовки.

Методы комбинированной обработки объединяют два или более различных способа обработки изделия и предназначены для повышения эффективности режимов обработки при получении трубчатых концентраторов-волноводов. Как правило, методы комбинированной обработки реализуются путем совмещения технологических процессов холодной деформации и электролитической обработки изделий. Холодная пластическая деформация выполняется для формообразования изделия и повышения его прочности за счет деформационного упрочнения. Электролитическое полирование проводится с целью удаления образующегося при высоких степенях холодной деформации дефектного слоя с повышенной плотностью дислокаций, содержащего также поверхностные микротрещины и механические включения.

Типичным примером применения *метода комплексной обработки* является волочение заготовки с частичным обжатием на 12–15 % до диаметра, превышающего диаметр готового изделия на 8–12 %, с последующей ЭПО [18, 19]. Проведенный в указанных работах микро-

структурный анализ образцов после волочения и образцов после волочения с последующей ЭПО продолжительностью 10 мин показал, что на поверхности образца после волочения присутствовали задиры, микротрещины и складки. После последующей ЭПО толщина слоя с измененной структурой составляла 20–25 мкм.

Для получения сферических наконечников на заготовках трубчатых концентраторов-волноводов необходимо выполнить две основные операции:

- 1) раздачу трубки в соответствии с размерами сферического наконечника;
- 2) обжим для получения сферической формы.

Радиальная раздача (входную или с нагревом) обычно производится в случае необходимости плавного увеличения диаметра трубы при дальнейшей калибровке и механической обработке. Для получения сферического наконечника после раздачи, калибровки и механической обработки наконечника трубки требуемого диаметра необходимо завальцевать края на нужный радиус. При завальцовке концов трубы в выпуклую сферическую форму обычно используются матрицы с нужными радиусами закругления.

В случае формирования боковых микроотверстий в сферическом наконечнике для кавитационного воздействия на стенки сосудов могут быть использованы методы гидроабразивного, лазерного сверления, электроэрозионная обработка. К недостаткам этих методов относятся низкое качество поверхности, ограничение по толщине материала, зависимость характеристик обработки от типа лазера и сложность формирования глухих отверстий [20–22]. В качестве альтернативы рассмотренным процессам формирования боковых микроотверстий в сферическом наконечнике может быть рассмотрена электрохимическая прошивка.

В [23] проведены исследования режимов прошивки микроотверстий квадратной формы с помощью электрохимической обработки в электролите на основе серной кислоты в образцах из коррозионностойкой стали AISI321 толщиной 0,1 мм. Стабильность и качество обработки были существенно повышены за счет применения импульсной электрохими-

ческой обработки. Такие режимы позволили прошивать квадратные отверстия шириной (100 ± 5) мкм с угловым радиусом закругления 12 мкм.

В [24] представлена разработка комбинированной технологии электроэрозионной и электрохимической прошивки микроотверстий в образцах из нержавеющей стали 12X18H10T (размером 0,46 мм) с использованием электроэрозионных разрядов в межэлектронном промежутке. Сочетание двух процессов позволило увеличить скорость прошивки почти в четыре раза, уменьшить конусность прошиваемых отверстий с $4,3^\circ$ до $2,5^\circ$. Также следует отметить, что для большего повышения точности прошивки микроотверстий рекомендуется использовать медный катод с электрически изолированной боковой поверхностью.

Основные режимы, используемые сегодня для электрохимической прошивки, представлены в [19]:

- электролит – 25 % NaNO_3 ;
- температура электролита – $(30 \pm 3)^\circ\text{C}$;
- напряжение обработки – 17 В.

ВЫВОДЫ

1. Анализ проведенного обзора отечественных и зарубежных патентных и литературных источников, а также выполненные исследования позволили остановиться на следующих методах поэтапного изготовления трубчатых концентраторов-волноводов: получение трубчатого ступенчатого элемента безопрочно волочением, получение рабочего наконечника раздачей и обжимом, получение боковых отверстий в рабочем наконечнике электрохимической прошивкой.

2. Для изготовления трубчатого ступенчатого элемента волновода целесообразно использовать схему безопрочного волочения, которая обеспечит формирование ступеней волновода диаметрами 1,0–1,5 мм с сохранением исходной толщины стенки (0,25 мм). При условии волочения с обжатием не более 0,1 и вытяжкой около 1,1 за проход для получения ступени волновода наименьшего диаметра (1,0 мм)

потребуется пять-шесть проходов. Для повышения усталостной прочности при изготовлении волочением рекомендуется проводить отжиг поверхности трубки с последующим нанесением смазочного материала.

3. При изготовлении рабочего наконечника необходимо произвести предварительную задачу до диаметра 1,35 мм. Затем выполняется обжим для получения сферической формы.

4. Для получения боковых отверстий диаметром 0,3 мм в рабочем наконечнике волновода целесообразно применять электрохимическую прошивку с использованием следующих режимов: электролит на основе NaNO_3 концентрацией 25 % с температурой $(30 \pm 3)^\circ\text{C}$, электрод – медная проволока диаметром 0,1 мм с лаковой изоляцией боковой поверхности, скорость подачи электрода – 20 мкм/с, напряжение обработки – 17 В.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волновод для внутрисосудистой тромбэктомии тромбов и тромбоболов и метод его изготовления: пат. 005704 ЕАПО, МПК А61В 17/22, 17/32; С25F 3/16 / А. Г. Мрочек, И. Э. Адзерихо, Ю. Г. Алексеев, В. Т. Минченя, В. Н. Страх, А. Ю. Королёв; опубл. 09.02.2005.
2. Seco, F. Modelling the Generation and Propagation of Ultrasonic Signals in Cylindrical Waveguides / F. Seco, A. R. Jiménez // *Ultrasonic Waves*; ed. A. Junior. Intech, 2012. <https://doi.org/10.5772/29804>.
3. Tao, Li. Horn-Type Piezoelectric Ultrasonic Transducer: Modelling and Applications / Li Tao, Ma1 Jan, F. L. Adrian // *Advances in Piezoelectric Transducers*; ed. Farzad Ebrahimi. 2011. <https://doi.org/10.5772/28753>.
4. Минченя, В. Т. Перспективы использования гибких ультразвуковых волноводных систем в медицине и технике / В. Т. Минченя, Д. А. Степаненко // *Приборы и методы измерений*. 2010. № 1. С. 6–16.
5. Минченя, В. Т. Применение ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / В. Т. Минченя, И. Э. Адзерихо, А. Ю. Королёв // *Доклады БГУИР*. 2016. Т. 101, № 7. С. 300–303.
6. Электрохимическая прошивка микроотверстий в трубчатом ступенчатом концентраторе-волноводе медицинского назначения / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 5. С. 386–394. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-386-394>.
7. Исаевич, Л. А. Исследование процесса получения высокопрочной проволоки из стали 12X18H10T волочением с электролитно-плазменной обработкой поверх-

- ности / Л. А. Исаевич, Ю. Г. Алексеев, А. Ю. Королёв // Вестник БНТУ. 2005. № 6. С. 30–33.
8. Польшко, А. Г. Технология получения трубок малого диаметра из ленты / А. Г. Польшко, Е. Н. Хотянович // Новые материалы и технологии их обработки: XIII Республ. студ. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2012. С. 90.
 9. Виноградов, В. С. Оборудование и технология дуговой автоматической и механизированной сварки / В. С. Виноградов. М.: Академия, 2017. 319 с.
 10. Хомич, Н. С. Обработка поверхностей в магнитном поле: эффективность и экология / Н. С. Хомич, Ю. Г. Алексеев, В. С. Нисс // Литье и металлургия. 2006. № 3. С. 115–120.
 11. Нанотехнология полирования в магнитном поле поверхностей деталей оптики, электроники и лазерной техники / Н. С. Хомич [и др.] // Порошковая металлургия: достижения и проблемы: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф., 22–23 сент. 2005 г. Минск: БНТУ, 2005. С. 223–225.
 12. Применение импульсных режимов при электрохимическом полировании коррозионноустойчивых сталей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 3. С. 200–208. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-200-208>.
 13. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / Г. Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В. А. Волосатова. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 719 с.
 14. Электролитно-плазменная обработка: особенности формирования парогазовой оболочки и ее влияние на съем материала при обработке поверхностей металлических изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Порошковая металлургия: достижения и проблемы: сб. матер. докладов Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 22–23 сент. 2005 г. / Ин-т порошковой металлургии; редкол.: Н. И. Пирожник [и др.]. Минск, 2005. С. 236–245.
 15. Электролитно-плазменное полирование титановых и ниобиевых сплавов / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2018. Т. 17, № 3. С. 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>.
 16. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.
 17. Семченко, Н. И. Коррозионное поведение аустенитных нержавеющей сталей после электролитно-плазменного полирования / Н. И. Семченко, А. Ю. Королёв // IV Междунар. симпоз. по теоретич. и приклад. плазмохимии, 13–18 мая 2005 г., г. Иваново, Россия: сб. тр. Иваново: Ивановский гос. хим.-технол. ун-т, 2005. Т. 2. С. 406–409.
 18. 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.
 19. Исследование влияния промежуточной электролитно-плазменной обработки в процессе деформационного упрочнения волочением / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Вестник ПГУ. № 3. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2012. № 11. С. 85–90.
 20. Kong, M. C. Aspects of Material Removal Mechanism in Plain Waterjet Milling on Gamma Titanium Aluminide / M. C. Kong, D. Axinte, W. Voice // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. P. 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.009>.
 21. Ultrashort Pulsed Laser Drilling and Surface Structuring of Microholes in Stainless Steels / L. Romoli [et al.] // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2014. Vol. 63, No 1. P. 229–232.
 22. Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев; под ред. Б. П. Саушкина. М.: Дрофа, 2002. 656 с.
 23. Mingcheng, G. Electrochemical Micromachining of Square Holes in Stainless Steel in H₂SO₄ / G. Mingcheng, Z. Yongbin, M. Lingchao // International Journal of Electrochemical Science. 2019. Vol. 14. P. 414–426. Doi: 10.20964/2019.01.40.
 24. Rakhimyanov, Kh. Prospects of Combining Electro-Erosive and Electrochemical Processes in Forming the Holes of a Small Diameter in Difficult-to-Process Materials / Kh. Rakhimyanov, S. Vasilevskaya // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 224. P. 01013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401013>.

Поступила 29.09.2020

Подписана в печать 16.11.2020

Опубликована онлайн 30.11.2020

REFERENCES

1. Mrochek A. G., Azeriho I. E., Aliakseyeu Yu. G., Minchenya V. T., Strakh V. N., Korolev A. Yu. (2005) *Waveguide for Intravascular Thromboectomy of Thrombi and Thromboebols and Method of its Manufacture*: Patent No 005704 EAPO (in Russian).
2. Seco F., Jiménez A. R. (2012) Modelling the Generation and Propagation of Ultrasonic Signals in Cylindrical Waveguides. A. Junior (ed.). *Ultrasonic Waves*. Intech. <https://doi.org/10.5772/29804>.
3. Tao Li, Jan Ma1, Adrian F. L. (2011) Horn-Type Piezoelectric Ultrasonic Transducer: Modelling and Applications. Farzad Ebrahimi (ed.). *Advances in Piezoelectric Transducers*. <https://doi.org/10.5772/28753>.
4. Minchenya V. T., Stepanenko D. A. (2010) Prospects for the Use of Flexible Ultrasonic Waveguide Systems in Medicine and Technology. *Pribory i Metody Izmereniy = Devices and Methods of Measurements*, (1), 6–16 (in Russian).
5. Minchenya V. T., Adzerikho I. E., Korolev A. Yu. (2016) Application of Tube-Type Ultrasonic Concentrators-Waveguides to Eliminate Obstruction of Blood Vessels. *Doklady BGUIR*, 101 (7), 300–303 (in Russian).
6. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Budnitskiy A. S., Wenqi Dai (2019) Electrochemical Cutting of Micro-Holes in Tubular Stepped Concentrator-Waveguide for Medical Purposes. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (5), 386–394. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-386-394> (in Russian).

7. Isaevich L. A., Aliakseyeu Yu.G., Korolev A. Yu. (2005) Investigation of the Process of Obtaining High-Strength Wire from Steel 12X18H10T by Drawing with Electrolytic-Plasma Surface Treatment. *Vestnik BNTU* [Bulletin of Belarusian National Technical University], (6), 30–33 (in Russian).
8. Polyko A. G., Khotyanovich E. N. (2012) Technology for Producing Small Diameter Tubes from Tape. *Novye Materialy i Tekhnologii ikh Obrabotki: XIII Respubl. Stud. Nauch.-Tekhn. Konf.* [New Materials and Technologies for Their Processing: XIII Republican Student Scientific and Technical Conference]. Minsk, Belarusian National Technical University, 90 (in Russian).
9. Vinogradov V. S. (2017) *Equipment and Technology of Automatic and Mechanized Arc Welding*. Moscow, Akademiya Publ. 319 (in Russian).
10. Khomich N. S., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S. (2006) Surface Treatment in a Magnetic Field: Efficiency and Ecology. *Lit'e i Metallurgiya = Foundry and Metallurgy*, (3), 115–120 (in Russian).
11. Khomich N. S., Aliakseyeu Yu. G., Niss V. S. [et al.] (2005) Nanotechnology of Polishing in a Magnetic Field of Surfaces of Parts of Optics, Electronics and Laser Technology. *Poroshkovaya Metallurgiya: Dostizheniya i Problemy: Sb. Dokl. Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., 22–23 Sent. 2005 g.* [Powder Metallurgy: Achievements and Challenges. Proceedings of Scientific and Technical Conference, Sept. 22–23, 2005]. Minsk, Belarusian National Technical University], 223–225 (in Russian).
12. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitskiy A. S. (2019) The Use of Pulse Modes in the Electrochemical Polishing of Corrosion-Resistant Steels. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (3), 200–208 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-3-200-208>.
13. Amitan G. L., Baisupov I. A., Baron Yu. M., Blyashko Ya. I., Vagin V. A., Volosatov V. A., Kratysh G. S., Lubyanskiy G. D., Nemilov E. F., Popov N. M., Pugachev S. I., Ushomirskaya L. A., Finkel'shtein A. Ya., Shelestov A. M. (1988) *Handbook of Electrochemical and Electrophysical Processing Methods*. Leningrad, Mashinostroyeniye Publ. 719 (in Russian).
14. Alekseev Yu. G., Kosobutskii A. A., Korolev A. Yu., Niss V. S., Kucheryavii V. D., Povzhik A. A. (2005) Electrolytic-Plasma Treatment: Features of the Formation of a Vapor-Gas Shell and its Effect on Material Removal During Surface Treatment of Metal Products. *Poroshkovaya Metallurgiya: Dostizheniya i Problemy: Sb. Mater. Doklady Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 22–23 Sent. 2005 g.* [Powder Metallurgy: Achievements and Challenges. Proceedings of Scientific and Technical Conference, Sept. 22–23, 2005]. Minsk, 236–245 (in Russian).
15. Aliakseyeu Yu. G., Korolyov A. Yu., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitskiy A. S. (2018) Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 17 (3), 211–219. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219> (in Russian).
16. Alekseev Y. G., Korolyov A. Y., Parshuta A. E., Niss V. S. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
17. Semchenko N. I., Korolev A. Yu. (2005) Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steels after Plasma Electrolytic Polishing. *IV Mezhdunar. Simpoz. po Teoretich. i Priklad. Plazmokhimi, 13–18 Maya 2005 g., g. Ivanovo, Rossiya: Sb. Tr. T. 2* [IV International Symposium on Theoretical and Applied Plasma Chemistry, May 13–18, 2005, Ivanovo, Russia: Proceedings of the Symposium. Vol. 2]. Ivanovo, Publishing House of Ivanovo State University of Chemistry and Technology, 406–409 (in Russian).
18. Aliakseyeu Yu. G., Strakh V. N., Korolev A. Yu. (2005) Integrated technology for the manufacture of medical equipment based on plastic deformation and physical and technical methods. *Lit'e i Metallurgiya = Foundry and Metallurgy*, (4), 180–187 (in Russian).
19. Alekseev Y., Isaevich L., Korolev A., Niss V. (2012) Investigation of the Influence of Intermediate Electrolytic-Plasma Treatment in the Process of Strain Hardening by Drawing. *Vestnik PGU. Seriya V. Promyshlennost'. Prikladnye Nauki = Vestnik of PSU. Series V. Industry. Applied Sciences*, (11), 85–90 (in Russian).
20. Kong M. C., Axinte D., Voice W. (2010) Aspects of Material Removal Mechanism in Plain Waterjet Milling on Gamma Titanium Aluminide. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.11.009>.
21. Romoli L., Rashed C. A. A., Lovicu G., Dini G., Tantussi F., Fuso F., Fiaschi M. (2014) Ultrashort Pulsed Laser Drilling and Surface Structuring of Microholes in Stainless Steels. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 63 (1), 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.053>.
22. Eliseev Yu. S., Krymov V. V., Mitrofanov A. A., Saushkin B. P. (2002) *Physicochemical Treatment Methods in the Production of Gas Turbine Engines*. Moscow, Drofa Publ. 656 (in Russian).
23. Mingcheng G., Yongbin Z., Lingchao M. (2019) Electrochemical Micromachining of Square Holes in Stainless Steel in H₂SO₄. *International Journal of Electrochemical Science*, 14, 414–426. <https://doi.org/10.20964/2019.01.40>.
24. Rakhimyanov Kh., Vasilevskaya S. (2018) Prospects of Combining Electro-Erosive and Electrochemical Processes in Forming the Holes of a Small Diameter in Difficult-to-Process Materials. *MATEC Web of Conferences*, 224, 01013. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822401013>.

Received: 29.09.2020

Accepted: 16.11.2020

Published online: 30.11.2020