

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-386-394>

УДК 621.9.047.7

Электрохимическая прошивка микроотверстий в трубчатом ступенчатом концентраторе-волноводе медицинского назначения

Канд. техн. наук, доц. Ю. Г. Алексеев¹⁾, канд. техн. наук А. Ю. Королёв¹⁾,
асп. А. С. Будницкий¹⁾, асп. Дай Вэньци¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Развитию ультразвуковых технологий лечения сосудов в последнее время уделяют большое внимание во всем мире. Авторами статьи совместно с кардиологами из БелМАПО и РНПЦ «Кардиология» разработаны новый эффективный метод лечения и ультразвуковое оборудование, позволяющие выполнять разрушение внутрисосудистых образований с одновременным повышением эластичности сосудистой стенки. Преимуществами метода являются отсутствие оперативного вмешательства, низкая вероятность осложнений, небольшая стоимость лечения. Основной компонент разработанного ультразвукового оборудования – ступенчатый концентратор-волновод трубчатого типа, имеющий на дистальном конце сферический наконечник с одним осевым отверстием диаметром 0,5 мм и тремя радиальными отверстиями диаметрами 0,3 мм, расположенными под углом 120° друг относительно друга. Основным эффектом применения концентратора-волновода достигается за счет ультразвукового вибромеханического воздействия сферическим наконечником на внутрисосудистое образование с последующим удалением продуктов разрушения путем их аспирации из сосудистого русла. Дополнительный эффект обеспечивается за счет кавитационного воздействия на сосудистое образование и стенки сосуда через отверстия в сферическом наконечнике потоками жидкости, подаваемой по внутренней полости ступенчатого концентратора-волновода, что способствует значительному улучшению эластических свойств сосудистой стенки при атеросклерозе и сахарном диабете. Для достижения максимальной эффективности воздействия кавитирующей струей на внутрисосудистые образования и на сосудистую стенку необходимо обеспечить высокую точность и качество поверхностей формируемых микроотверстий. По результатам анализа особенностей существующих методов формообразования отверстий малого диаметра предложен метод электрохимической прошивки, позволяющий получать точные микроотверстия диаметром 0,3 мм с высоким качеством поверхности на деталях малого сечения и жесткости. В статье представлены результаты исследования влияния параметров процесса электрохимической прошивки (напряжения, концентрации и расхода электролита) на размеры и форму получаемых микроотверстий. Разработаны основные режимы процесса электрохимической прошивки, позволяющие сформировать микроотверстия в сферическом наконечнике трубчатого концентратора-волновода требуемых точности, размеров и формы.

Ключевые слова: концентратор-волновод, сферический наконечник, микроотверстие, электрохимическая прошивка, электролит, напряжение, расход, концентрация

Для цитирования: 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>

Electrochemical Cutting of Micro-Holes in Tubular Stepped Concentrator-Waveguide for Medical Purposes

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

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

Abstract. A great attention has been recently paid to development of ultrasound technologies for treatment of blood vessels throughout the world. Authors of the paper have developed a new effective treatment method and ultrasound equipment that

Адрес для переписки

Королёв Александр Юрьевич
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 24,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

Address for correspondence

Korolyov Aleksandr Yu.
Belarusian National Technical University
24 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-25-98
korolyov@park.bntu.by

allow to carry out destruction of intravascular formations with simultaneous increase in elasticity of a vascular wall together with cardiologists from Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education and Republican Scientific and Practical Center "Cardiology". Advantages of the method are absence of necessity in surgical intervention, low probability of complications, low cost of treatment. The main component of the developed ultrasonic equipment is a tube-type stepped concentrator-waveguide having a spherical tip at a distal end with a single axial hole of 0.5 mm-diameter and three radial holes of 0.3 mm-diameter located at an angle of 120° relative to each other. The main effect for application of the concentrator-waveguide is achieved by ultrasonic vibromechanical action of a spherical tip on intravascular formation with subsequent removal of destruction products by their aspiration from a vascular bed. An additional effect is provided due to cavitation action on vascular formation and vessel walls by flow of fluid supplied via an internal cavity of the stepped concentrator-waveguide through the holes in the spherical tip. This contributes to a significant improvement in elastic properties of a vascular wall in atherosclerosis and diabetes. It is necessary to ensure high accuracy and quality of surfaces for the formed micro-holes in order to achieve maximum efficiency of the cavitation jet impact on intravascular formations and on the vascular wall. According to the analysis results on specific features of existing methods for small-diameter hole shaping, an electrochemical hole cutting method has been proposed which allows to obtain accurate micro-holes with a diameter of 0.3 mm and high surface quality in parts of small cross section and rigidity. The paper presents results of study on effect of electrochemical holes cutting parameters (voltage, concentration and consumption of electrolyte) on size and shape of the formed micro-holes. Main modes of electrochemical holes cutting process have been developed which allow to form micro-holes in a spherical tip of a tubular concentrator-waveguide with required accuracy, dimensions and shape.

Keywords: concentrator-waveguide, spherical tip, micro-hole, electrochemical hole cutting, electrolyte, voltage, consumption, concentration

For citation: 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. *Science and Technique*. 18 (5), 386–394. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-5-386-394> (in Russian)

Введение

В качестве альтернативы существующим дорогостоящим и травматическим процедурам устранения непроходимости магистральных артерий нижних конечностей разработан метод разрушения внутрисосудистых образований – ультразвуковая реканализация [1]. Метод основан на применении ультразвукового оборудования, главным компонентом которого является ступенчатый концентратор-волновод. Ранее разработаны конструкции и процессы получения стержневых ступенчатых концентраторов-волноводов длиной до 1200 мм с минимальным диаметром дистальной ступени 0,5 мм. Для формообразования сложных поверхностей стержневых концентраторов-волноводов создана оригинальная технология, основанная на электролитно-плазменной обработке, которая использовалась до этого в промышленности только для финишной отделки поверхности и удаления заусенцев на изделиях из различных металлических материалов [2–6]. Применение размерной электролитно-плазменной обработки позволило достигнуть высоких прочностных и акустических показателей получаемых изделий.

Для обеспечения возможности подачи жидкости в зону дислокации внутрисосудистого образования с целью дополнительного кавитационного воздействия разработана новая конструкция – ступенчатый концентратор-волновод трубчатого типа с полым сферическим

наконечником, наличие которого позволяет максимально эффективно разрушать внутрисосудистые образования за счет виброударного воздействия [7, 8]. В сферическом наконечнике имеются осевое ($0,50 \pm 0,05$ мм) и боковые ($0,30 \pm 0,05$ мм) микроотверстия, предназначенные для воздействия образующейся кавитирующей струей как на внутрисосудистое образование, так и на пораженный участок сосудистой стенки, что позволяет восстанавливать проходимость сосуда с одновременным повышением эластичности сосудистой стенки (рис. 1).



Рис. 1. Сферический наконечник ступенчатого концентратора-волновода трубчатого типа
Fig. 1. Spherical tip of tube-type stepped concentrator-waveguide

Эффективность кавитационных процессов во многом определяется качеством поверхностей, с которыми соприкасается рабочая

жидкость [9]. Элементы микрорельефа, выступающие из ламинарного подслоя при турбулентном течении жидкости, вызывают вихреобразование с понижением давления в месте образования вихрей. Таким образом, высокая шероховатость поверхности внутри микроотверстия приводит к более раннему возникновению кавитационных процессов. Поэтому для максимально эффективного воздействия кавитирующей струей на внутрисосудистые образования и сосудистую стенку необходимо обеспечить высокие точность и качество поверхностей формируемых микроотверстий.

Осевое отверстие, оказывающее основное кавитационное воздействие при разрушении внутрисосудистых образований, формируется в процессе получения сферического наконечника раздачей и завальцовкой. Формирование боковых микроотверстий в сферическом наконечнике с высокой точностью является сложной технической задачей в связи с особенностями конструкции концентратора-волновода, обладающего низкой жесткостью, тонкой стенкой, малыми размерами рабочей части.

В настоящее время в промышленности существует множество способов получения микроотверстий диаметрами 0,2–0,3 мм, включающих механическое сверление, сверление лазером, электроэрозионное и химическое сверление, гидроабразивную обработку, а также их различные сочетания, каждый из которых имеет свои преимущества и недостатки. Одним из традиционных методов является механическое сверление микроотверстий, получившее широкое распространение при производстве печатных плат для электроприборов [10]. На печатных платах, которые, как правило, изготавливаются из легко поддающихся механической обработке полимерных материалов, возможно получение микроотверстий диаметром до 0,1 мм [11]. Основным недостатком механического метода, в том числе применительно к процессу получения отверстий в сферическом наконечнике, является невозможность сверления микроотверстий в нежестких и тонкостенных деталях.

Лазерное сверление позволяет получать отверстия диаметром, соизмеримым с длиной волны излучения с достаточно высокой точностью позиционирования. Существует множе-

ство работ по исследованию режимов и способов лазерного сверления микроотверстий в коррозионноустойчивых сталях, подтверждающих целесообразность использования лазерной технологии для получения изделий малого размера, обработка которых должна удовлетворять высоким параметрам по точности и качеству [12–17]. Среди недостатков лазерного метода сверления – низкое качество поверхности, ограничение по толщине материала, зависимость характеристик обработки от типа лазера и сложность формирования глухих отверстий.

Гидроабразивное сверление особенно эффективно при очистке или обработке многих труднообрабатываемых материалов: титановых сплавов [18], различных видов высокопрочных керамик [19] и сталей [20], а также композитных материалов [21]. При гидроабразивной резке не создается разрывов в структуре материала, который таким образом сохраняет свои первоначальные свойства. Однако, как и при лазерном сверлении, гидроабразивная обработка не дает возможности сверления глухих отверстий.

Альтернативой перечисленным методам получения отверстий малых диаметров является электрохимическая прошивка с прокачкой электролита между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. В [22] выполнялась сравнительная оценка методов механического, лазерного и электрохимического сверления при разработке наиболее оптимального процесса получения микроотверстий в тонкостенных пластинах (0,5 мм) из титанового сплава. Установлено, что механическое и лазерное сверление не обеспечивают требуемой точности размеров микроотверстий и качества поверхности. Электрохимическая прошивка, в свою очередь, позволила получить точные отверстия по форме и размерам с высоким качеством поверхности. Таким образом, метод электрохимической прошивки может быть использован для формирования точных боковых микроотверстий в сферическом наконечнике трубчатого концентратора-волновода с достижением высокого качества их поверхности для эффективного воздействия кавитирующей струей на внутрисосудистые образования и сосудистую стенку.

Цель данной работы – разработка и исследование режимов электрохимической прошив-

ки, обеспечивающих формирование микроотверстий требуемой точности в тонкостенных деталях малой жесткости и размеров из коррозионностойкой стали, применяемых в медицинской технике.

Материалы, оборудование и методы исследований

Исследование режимов электрохимической прошивки микроотверстий проводили на образцах сферических наконечников трубчатого концентратора-волновода с толщиной стенки 0,15 мм из коррозионностойкой стали 12Х8Н10Т. Для прошивки использовалась традиционная схема сплошного стержневого медного электрода-инструмента, направляемого по определенным координатам, с одновременной прокачкой рабочей жидкости между электродом-инструментом и обрабатываемой деталью. В качестве электролита применяли водный раствор NaNO_3 [23].

Экспериментальное оборудование, разработанное для выполнения исследований режимов электрохимической прошивки, представлено на рис. 2. Медный электрод-инструмент с помощью цангового зажима закрепляется на двухкоординатном микрометрическом столике. Микрометрический столик позволяет точно позиционировать электрод-инструмент относительно продольной оси трубчатой заготовки, а также обеспечивает плавную подачу электрода-инструмента в зону обработки. Позиционирование по вертикальной оси осуществляется с помощью направляющей пары с соединением «ласточкин хвост», которая приводится в движение винтовой передачей.

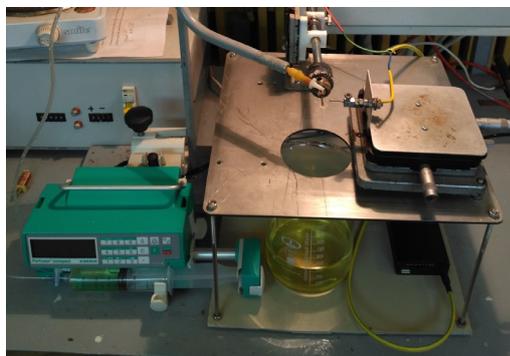


Рис. 2. Экспериментальное оборудование для электрохимической прошивки микроотверстий

Fig. 2. Experimental equipment for electrochemical broaching of micro-holes

Образец зажимается в кулачковый патрон, который закреплен на валу. Вал установлен в диэлектрических кронштейнах из фторопласта. Вращением вала вокруг оси устанавливается требуемый угловой шаг взаимного расположения прошиваемых боковых отверстий в сферическом наконечнике. При этом осевое перемещение вала относительно диэлектрических кронштейнов ограничено двумя фиксирующими кольцами.

Для работы оборудования использовался источник питания с регулировкой рабочего напряжения от 12 до 20 В и силой тока до 8 А. Положительный полюс источника питания подключался к образцу, отрицательный – к медному электроду-инструменту. Дозированная подача электролита в межэлектродное пространство и расход электролита контролировались и изменялись в широком диапазоне с помощью шприцевого дозатора Perfusor Compact S. Концентрация электролита изменялась в пределах 20–30 % с шагом 5 %; расход электролита 40–80 мл/мин с шагом 20 мл/мин; рабочее напряжение 12–18 В с шагом 3 В. Предварительно установлено, что для получения отверстий диаметром 0,30 мм при толщине стенки 0,15 мм диаметр электрода-инструмента должен составлять 0,05–0,09 мм. Для выполнения исследований был принят медный электрод-инструмент с диаметром активной части 0,07 мм.

Оценка размеров и состояния поверхностей формируемых микроотверстий производилась с помощью электронного микроскопа Tescan Vega.

Результаты исследований и их обсуждение

В качестве примера на рис. 3 представлены фотографии микроотверстий для некоторых режимов обработки.

Как видно из фотографий микроотверстий, режимы электрохимической прошивки существенно влияют не только на точность размеров и форму прошитых микроотверстий, но и на качество прилегающей к прошитому микроотверстию поверхности. В частности, на рис. 3а показан кратер с большим радиусом прилегающей области травления, образующийся при низкой концентрации электролита и высоких значениях напряжения и расхода электролита.

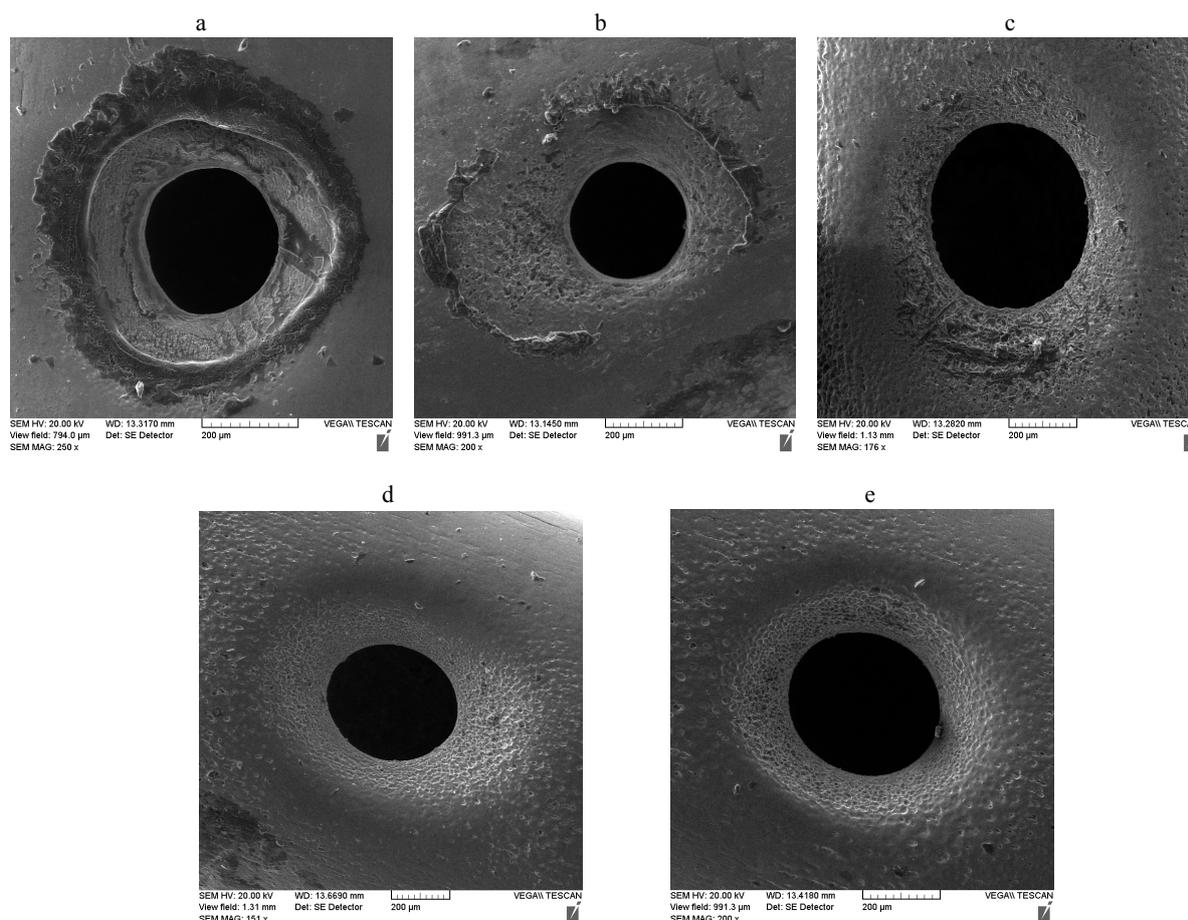


Рис. 3. Фотографии микроотверстий: а – 20 %, 18 В, 80 мл/мин; б – 20 %, 15 В, 60 мл/мин; с – 30 %, 18 В, 60 мл/мин; д – 25 %, 12 В, 60 мл/мин; е – 25 %, 15 В, 60 мл/мин
 Fig. 3. Photos of micro-holes: a – 20 %, 18 V, 80 ml/min; b – 20 %, 15 V, 60 ml/min; c – 30 %, 18 V, 60 ml/min; d – 25 %, 12 V, 60 ml/min; e – 25 %, 15 V, 60 ml/min

Снижение значений рабочего напряжения и расхода электролита (рис. 3б) не ведет к уменьшению радиуса кратера, однако способствует заметному уменьшению интенсивности травления прилегающей области. На рис. 3с показано отверстие, прошитое при повышенных значениях концентрации электролита и рабочего напряжения. Увеличение концентрации позволяет получить гладкую скругленную поверхность без образования кратера, однако при высоком рабочем напряжении скорость электрохимической прошивки очень велика, вследствие чего наблюдается образование отверстия большого диаметра, превышающего требуемое значение на 42 %. Режим электрохимической прошивки с концентрацией электролита 25 %, рабочим напряжением 15 В и расходом электролита 60 мл/мин позволяет

получить отверстие с гладкой внутренней поверхностью и минимальным радиусом закругления (рис. 3е).

Рассмотрим влияние характеристик процесса электрохимической прошивки на диаметр формируемого микроотверстия более подробно. На рис. 4 представлена трехмерная зависимость изменения диаметра прошиваемого отверстия от рабочего напряжения и расхода электролита для концентрации 25 %. Повышение рабочего напряжения с 12 до 18 В приводит к увеличению диаметра прошитого отверстия. При значениях напряжения 12 В происходит заметное уменьшение кратера, образующегося вокруг отверстия в процессе электрохимической прошивки (рис. 3б). Однако при низком значении рабочего напряжения уменьшается производительность процесса прошивки и повыша-

ется вероятность замыкания электрода на образец из-за малой величины межэлектродного промежутка. Увеличение рабочего напряжения до 18 В существенно повышает производительность обработки. Однако при этом диаметр прошеного отверстия больше номинального значения на 32–38 %, что превышает требуемые допуски. Соответственно прошивку целесообразно выполнять при напряжении около 15 В.

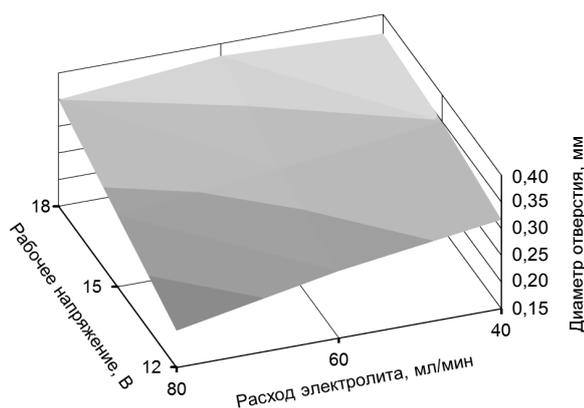


Рис. 4. Зависимость диаметра прошиваемого микроотверстия от рабочего напряжения при различных значениях расхода для концентрации электролита 25 %

Fig. 4. Dependence of broached micro-hole diameter on operating voltage at different flow rates for electrolyte concentration of 25 %

На рис. 5 представлена зависимость диаметра прошеного отверстия от расхода электролита для концентраций 20, 25 и 30 % при напряжении 12 В. Из полученной зависимости видно, что с увеличением расхода электролита через межэлектродный промежуток уменьшается размер формируемого в результате прошивки микроотверстия. Это связано с изменением проводимости электролита в межэлектродном промежутке в зависимости от содержания в нем продуктов электрохимического растворения. Недостаточная скорость потока электролита в межэлектродном зазоре не обеспечивает своевременного и достаточного удаления продуктов анодного растворения и водорода, выделяющегося на катоде, и, как следствие, увеличивается сопротивление в межэлектродном зазоре и снижается плотность тока [24]. Так, в ходе экспериментов при значениях расхода электролита менее 40 мл/мин наблюдалось частое замыкание образца с электродом-инструментом.

Повышение расхода электролита (от 40 до 60 мл/мин) приводит к более интенсивному удалению продуктов электрохимического растворения из межэлектродного промежутка и стабилизации процесса электрохимической прошивки. При таком расходе обеспечивалось формирование микроотверстий правильной формы со сглаженными краями. Чрезмерные значения расхода электролита (более 60 мл/мин) приводили к нарушению стабильности процесса прошивки, что выражалось в частом замыкании и оплавлении электрода-инструмента. Это может быть связано с возникновением кавитационных явлений, что наиболее характерно при обработке нежестким электродом [24], каким и является используемый электрод-инструмент диаметром 0,07 мм.

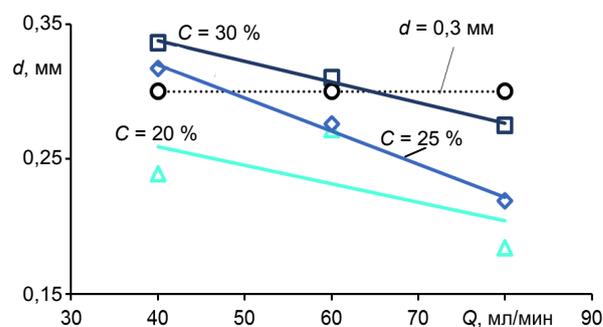


Рис. 5. Зависимость диаметра прошеного микроотверстия от расхода электролита при различных значениях концентрации электролита для рабочего напряжения 12 В

Fig. 5. Dependence of broached micro-hole diameter on electrolyte consumption at different concentrations of electrolyte for operating voltage of 12 V

Повышение концентрации электролита в электрохимических процессах приводит к увеличению проводимости и соответственно к повышению плотности тока. Зависимость диаметра прошиваемого отверстия от концентрации электролита представлена на рис. 6. При малой концентрации электролита не обеспечиваются условия, необходимые для электрохимического растворения прошиваемого материала. Так, в процессе прошивки отверстий с применением электролита концентрацией 20 % наблюдалось частое приваривание и обрыв электрода-инструмента. Однако при этом обеспечивалась наиболее точная геометрия прошиваемого отверстия (± 20 мкм) без образования

кратера (рис. 7а). В случае чрезмерно высокой концентрации (30 %) снижалась точность прошиваемого отверстия (± 150 мкм), а на входе в отверстие формировался кратер (рис. 7с) достаточно большого размера (диаметром до 0,65 мм и глубиной до 0,15 мм). Наиболее приемлемые результаты были достигнуты на режимах прошивки с применением электролита концентрацией 25 % (рис. 7б), при которых обеспечивались стабильность электрохимического процесса, достижение требуемой точности и качества поверхности формируемых микроотверстий, а также минимальные размеры кратера на входе в отверстие.

Фотография образца со сферическим наконечником трубчатого концентратора-волновода с прошитыми микроотверстиями, полученными с использованием установленных по результатам исследования параметров процесса, обеспечивающих высокую точность получаемых

микроотверстий и качество прилегающей к ним поверхности, стабильность процесса (напряжение 15 В, расход электролита 60 мл/мин, концентрация электролита 25 %), представлена на рис. 8.

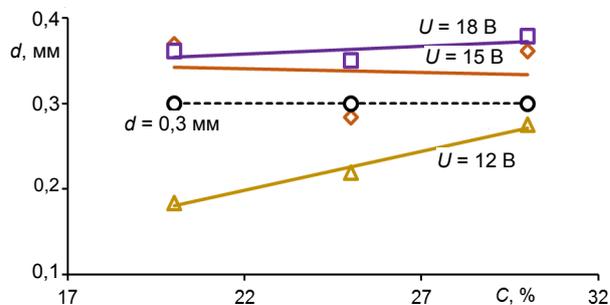


Рис. 6. Зависимость диаметра прошитого микроотверстия от концентрации электролита при различных значениях рабочего напряжения для расхода электролита 80 мл/мин

Fig. 6. Dependence of broached micro-hole diameter on electrolyte concentration at different operating voltages for electrolyte consumption of 80 ml/min

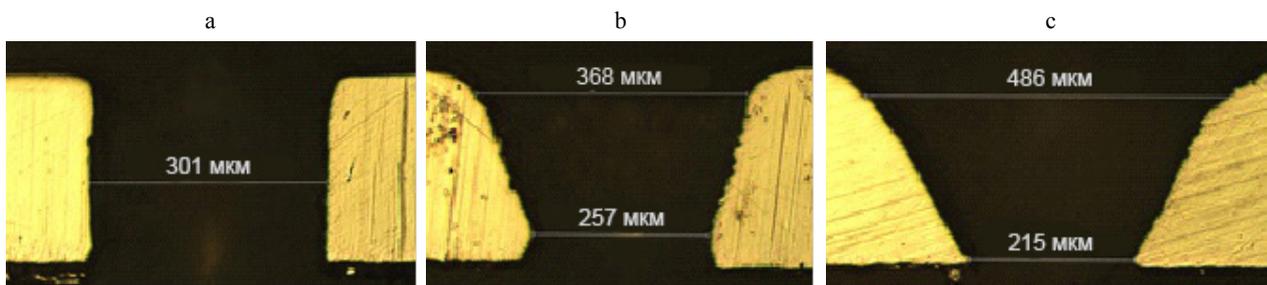


Рис. 7. Фотографии шлифов прошитых микроотверстий: а – 20 %, 15 В, 60 мл/мин; б – 25 %, 15 В, 60 мл/мин; с – 30 %, 18 В, 60 мл/мин

Fig. 7. Photos of metallographic sections in broached micro-holes: а – 20 %, 15 V, 60 ml/min; б – 25 %, 15 V, 60 ml/min; с – 30 %, 18 V, 60 ml/min



Рис. 8. Фотография наконечника с прошитыми микроотверстиями

Fig. 8. Photo of tip with broached micro-holes

ВЫВОДЫ

1. Результаты анализа методов формирования микроотверстий в тонкостенных деталях малой жесткости и размеров с помощью механического, лазерного, гидроабразивного и электрохимического сверления, а также результаты экспериментальных исследований электрохимической технологии показали, что с учетом требований, предъявляемых к микроотверстиям в сферических наконечниках ультразвуковых ступенчатых концентраторов-волноводов медицинского назначения, наиболее приемлемым методом их получения является электрохимическая прошивка, позволяющая формировать точные микроотверстия с высоким качеством внутренней поверхности с отклонением по диаметру не более 0,05 мм.

2. В результате экспериментальных исследований влияния напряжения, концентрации и расхода электролита в процессе электрохимической прошивки на точность размеров и формы получаемых микроотверстий установлено, что для обеспечения допустимого отклонения диаметра микроотверстий, высокого качества и геометрии прилегающей к ним поверхности, а также стабильности процесса необходимо выполнять обработку со следующими параметрами: напряжение 15 В, расход электролита 60 мл/мин, концентрация электролита 25 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталева. Минск: БНТУ, 2015. 203 с.
2. Влияние электролитно-плазменной обработки на структуру и свойства поверхностного слоя стали 12Х18Н10Т / И. В. Фомихина [и др.] // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 3. С. 24–29.
3. Модель размерного съема материала при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2012. № 3. С. 3–6.
4. Электролитно-плазменная обработка при нестационарных режимах в условиях высокоградиентного электрического поля / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2017. Т. 16, № 5. С. 391–399. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391-399>.
5. 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>.
6. Электролитно-плазменная обработка внутренних поверхностей трубчатых изделий / Ю. Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника. 2016. Т. 15, № 1. С. 61–68. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68>.
7. 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.
8. Минченя, В. Т. Исследование процесса формообразования волочением ступенчатых поверхностей ультразвуковых концентраторов-волноводов трубчатого типа для устранения непроходимости кровеносных сосудов / В. Т. Минченя, А. Ю. Королёв, Дай Вэньци // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 26–27 апр. 2018 г. / редкол.: И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. Могилев: Белор.-Рос. ун-т, 2018. С. 41–42.
9. Юрьев, А. С. Справочник по расчетам гидравлических и вентиляционных систем / А. С. Юрьев. СПб.: Мир и семья, 2001. 1154 с.
10. A review on Drilling Printed Circuit Boards / L. J. Zheng [et al.] // Advanced Materials Research. 2011. Vol. 188. P. 441–449.
11. I Interaction of Cemented Carbide Micro-Drills and Printed Circuit Boards During Micro-Drilling / L. J. Zheng [et al.] // International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2014. Vol. 77, No 5–8. P. 1305–1314. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6520-1>.
12. Ultrashort Pulsed Laser Drilling and Surface Structuring of Microholes in Stainless Steels / L. Romoli [et al.] // CIRP Annals. 2014. Vol. 63, No 1. P. 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.053>.
13. Laser Drilling of Stainless Steel with Nanosecond Double-Pulse / X. D. Wang [et al.] // Optics & Laser Technology. 2009. Vol. 63, No 2. P. 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.05.021>.
14. Jiang Jing. Research on Microporous Machining Technology of Metal Materials by Picosecond Laser / Jing Jiang // Beijing University of Technology Master Thesis. Beijing, 2014. 61 p.
15. Research on Femtosecond Laser Efficient Parallel Micro-Hole Machining Technology / Luo Zhang [et al.] // Journal of Hubei University of Technology. 2018. Vol. 33, No 4. P. 19–21.
16. Ultrashort Pulse Laser Micropore Processing / W. Zhao [et al.] // Infrared and Laser Engineering. 2018. Vol. 10. P. 1–9.
17. Experimental Study on Picosecond Laser Processing of Stainless Steel Micropores / L. Y. Liu [et al.] // Applied Laser. 2015. Vol. 35, No 4. P. 472–478.
18. Kong, M. C. Aspects of Material Removal Mechanism in Plain Waterjet Milling on Gamma Titanium Aluminate / M. C. Kong, D. Axinte, W. Voice // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. P. 573–584.
19. Wang, J. The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics / J. Wang, D. M. Guo // Journal of Materials Processing Technology. 2003. Vol. 133. P. 371–377.
20. Improving Surface Hardness of Austenitic Stainless Steel Using Waterjet Peening Process / A. Azhari [et al.] // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012. Vol. 63. P. 1035–1046.
21. Azmir, M. A. A Study of Abrasive Water Jet Machining Process on Glass/Epoxy Composite Laminate / M. A. Az-

- mir, A. K. Ahsan // *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209. P. 6168–6173.
22. Grachev, M. V. Comparison of Technological Methods for Small Diameter Hole Perforation in Titanium Alloys / M. V. Grachev // *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7, No 3.19. P. 105–107.
23. 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.
24. Мороз, И. И. Электрохимическая размерная обработка металлов / И. И. Мороз. М.: Машиностроение, 2009. С. 279.

Поступила 15.05.2019

Подписана в печать 23.07.2019

Опубликована онлайн 30.09.2019

REFERENCES

- Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Minchenya V. T., Niss V. S., Parshuto A. E., Khrustalev B. M. (2015) *Combined Technology for Manufacturing of Flexible Ultrasonic Concentrators-Instruments*. Minsk, Belarusian National Technical University. 203 (in Russian).
- Fomikhina I. V., Litovskaya Yu. O., Alekseev Yu. G., Korolev A. Yu., Niss V. S. (2008) Influence of Electrolytic-Plasma Treatment on Structure and Properties in Surface Layer of Authentic Stainless 12X18H10T – Steel. *Vestsi Natsionalnoy Akademii Navuk Belarusi. Ser. Fiz. Tekhn. Navuk = Bulletin of National Academy of Science of Belarus. Series of Physical and Technical Sciences*, (3), 24–29 (in Russian).
- Alekseev Yu., Korolev A., Parshuta A., Niss V. (2012) Model for Metal Removal in Electrolyte-Plasma Treatment of Cylindrical Surfaces. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (3), 3–6 (in Russian).
- Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Y., Parshuto A. E., Niss V. S. (2017) Electrolyte-Plasma Treatment under Non-Stationary Mode in a High-Gradient Electric Field. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (5), 391–399 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-5-391399>.
- Aliakseyeu Y. G., Korolyov A. Y., Niss V. S., Parshuto A. E., Budnitskiy A. S. (2018) Electrolyte-Plasma Polishing of Titanium and Niobium Alloys. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 17 (3), 211–219 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-3-211-219>.
- Alekseev Y. G., Korolyov A. Y., Niss V. S., Parshuta A. E. (2016) Electrolytic-Plasma Treatment of Internal Surface in Tubular Products. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 15 (1), 61–68 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2016-15-1-61-68>.
- Minchenya V. T., Adzerikho I. E., Korolev A. Yu. (2016) The Use of Ultrasonic Concentrators-Waveguides of Tubular Type to Eliminate the Obstruction of Blood Vessels. *Doklady Belorusskogo Gosudarstvennogo Universiteta Informatiki i Radioelektroniki = Doklady BGUIR*, 101 (7), 300–303 (in Russian).
- Minchenya V. T., Korolev A. Yu., Dai Wenqi (2018) Investigations on Forming Process while Using Drawing Method for Stepped Surfaces of Ultrasonic Concentrators-Waveguides of Tubular Type to Eliminate Obstruction of Blood Vessels. *Materialy, Oborudovanie i Resursoberegayushchie Tekhnologii: Materialy Mezhdunar. Nauch. Tekhn. Konf., 26–27 apr. 2018 g.* [Materials, Equipment and Resource Saving Technologies: Proceedings of International Scientific and Technical Conference, Apr. 26–27, 2018]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 41–42 (in Russian).
- Yuriev A. S. (2001) *Handbook for Calculation of Hydraulic and Ventilation Systems*. Saint Petersburg, Mir i Semya Publ. 1154 (in Russian).
- Cheng Yong Wang, Yue Xian Song, Yang L. P., Qu Y. P., Ping Ma, Fu L. Y. (2011) A review on Drilling Printed Circuit Boards. *Advanced Materials Research*, 188, 441–449. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.188.441>.
- Li Juan Zheng, Cheng Yong Wang, Yun Peng Qu, Yue Xian Song, Lian Yu Fu (2014) Interaction of Cemented Carbide Micro-Drills and Printed Circuit Boards During Micro-Drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77 (5–8), 1305–1314. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6520-1>.
- 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*, 63 (1), 229–232. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2014.03.053>.
- Wang X. D., Michalowski A., Walter D., Sommer S., Kraus M., Liu J. S., Dausinger F. (2009) Laser Drilling of Stainless Steel with Nanosecond Double-Pulse. *Optics & Laser Technology*, 63 (2), 148–153. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2008.05.021>.
- Jiang Jing (2014) *Research on Microporous Machining Technology of Metal Materials by Picosecond Laser*. Beijing, Beijing University of Technology Master Thesis. 61.
- Luo Zhang [et al.] (2018) Research on Femtosecond Laser Efficient Parallel Micro-Hole Machining Technology. *Journal of Hubei University of Technology*, 33 (4), 19–21 (in China).
- Zhao W. [et al.] (2018) Ultrashort Pulse Laser Micropore Processing. *Infrared and Laser Engineering*, 10, 1–9.
- Liu L. Y. [et al.] (2015) Experimental Study on Picosecond Laser Processing of Stainless Steel Micropores. *Applied Laser*, 35 (4), P. 472–478.
- 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>.
- Wang J., Guo D. M. (2003) The Cutting Performance in Multipass Abrasive Waterjet Machining of Industrial Ceramics. *Journal of Materials Processing Technology*, 133, 371–377. [https://doi.org/10.1016/s0924-0136\(02\)01125-1](https://doi.org/10.1016/s0924-0136(02)01125-1).
- Azhari A., Schindler C., Kerscher E., Grad P. (2012) Improving Surface Hardness of Austenitic Stainless Steel Using Waterjet Peening Process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63, 1035–1046. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-3962-1>.
- Azmir M. A., Ahsan A. K. (2009) A Study of Abrasive Water Jet Machining Process on Glass/Epoxy Composite Laminate. *Journal of Materials Processing Technology*, 209, 6168–6173. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.011>.
- Grachev M. V. (2018) Comparison of Technological Methods for Small Diameter Hole Perforation in Titanium Alloys. *International Journal of Engineering & Technology*, 7 (3), 105–107. <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i3.19.16995>.
- Amiran G. L., Baisupov I. A., Baron Yu. M., Volosatov V. A. (1988) *Handbook on Electrochemical and Electrophysical Processing Methods*. Leningrad, Mashinistroyenie Publ. 719 (in Russian).
- Moroz I. I. (2009) *Electrochemical Dimensional Processing of Metals*. Moscow, Mashinistroyenie Publ. 279 (in Russian).

Received: 15.05.2019

Accepted: 23.07.2019

Published online: 30.09.2019