

УДК 621.794.61

Ю. Г. АЛЕКСЕЕВ^{1,2}, канд. техн. наук, доц.

А. Ю. КОРОЛЕВ², канд. техн. наук, доц.

ДАЙ ВЭНЬЦИ^{1,2}

¹Инновационный международный центр научно-образовательного и коммерческого сотрудничества «Дело» (Минск, Беларусь)

²Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (Минск, Беларусь)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕДИЦИНСКОГО ВОЛНОВОДА

Аннотация

Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния электролитно-плазменной обработки на состояние рабочих поверхностей ультразвуковых ступенчатых волноводов трубчатого типа: точность размеров, качество поверхности, блеск, параметр шероховатости Ra и коррозионную стойкость. Показано, что выполняются условия по достижению требуемого 7-го качества точности, на поверхности отсутствуют заусенцы, острые кромки и окалина, уменьшается параметр шероховатости до $Ra = 0,1$ мкм, повышается блеск на 60 % и возрастает коррозионная стойкость.

Ключевые слова:

точность размеров, шероховатость и блеск поверхности, коррозионная стойкость, технологические операции обработки.

Одним из наиболее эффективных методов повышения качества поверхности при производстве изделий медицинского назначения является электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая обеспечивает качественное полирование и глянецование поверхности, удаление заусенцев, скругление острых кромок [1].

В работе исследовалась в качестве финишной операции ЭПО рабочих поверхностей ультразвуковых ступенчатых концентраторов-волноводов трубчатого типа (УСКВТТ), предназначенных для внутренней обработки кровеносных сосудов. Данные изделия длинномерные (до 800 мм), с малым наружным диаметром (от 1,5 до 1,0 мм) и изготавливаются из стали 12Х18Н9.

Технологический процесс изготовления УСКВТТ комбинированный и включает такие операции ОМД, как волочение, раздача и обжим. При выполнении данных операций с целью повышения пластичности и снижения предела текучести перед деформированием материал трубы подвергается закалке в воду с 1150 °С. Нагрев вызывает растворение карбидов хрома, а быстрое охлаждение фиксирует пересыщенный его твердый раствор. Выделение из аустенита при закалке исключено, т. к. скорость охлаждения велика. Достигаются высокие характеристики пластичности и $\sigma_6 \sim 500$ МПа.

В ходе закалки на воздухе при $T = 1150$ °С с охлаждением в воде в результате тепловой коррозии – прямого воздействия кислорода на металл, на поверхности стали 12Х18Н9 образуется окалина – смесь оксидов. Образуются как простые окислы (оксид железа (II), оксид железа (III), оксид хрома (III) и оксид никеля),

так и сложные оксиды ($\text{NiO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$, NiCr_2O_4 и др.). Так как поверхность полностью покрыта прочно сцепленной с ней окалиной темного цвета, то толщина ее слоя свыше 500 нм [2]. Состояние поверхности соответствует категории «А» по международному стандарту ИСО 8501-1:2007.

По техническим условиям к поверхности УСКВТТ предъявляются следующие требования: отсутствие царапин, заусенцев, загрязнений (окалины и следов смазки), размеры рабочих поверхностей должны соответствовать 7-му качеству точности, а параметр шероховатости поверхности Ra не должен превышать 0,1 мкм.

В качестве образцов для выполнения исследований использовались отрезки трубки диаметром $D = 1,69$ мм, полученной в результате волочения за один проход из исходной трубной заготовки диаметром $D = 1,8$ мм. Образец трубки перед проведением ЭПО подвергали закалке в воду от $T = 1150$ °С, в результате которой на его поверхности образовалась окалина темного цвета (рис. 1).



Рис. 1. Исходный образец

Для обработки образцов использовали режим, применяемый для полирования изделий медицинского назначения из коррозионно-стойких сталей [3, 4]: напряжение $U = 300$ В, электролит – 4 % сульфата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, температура электролита $T = 90$ °С. Плотность тока при этом составляла $J = 0,10 \dots 0,15$ А/см². Также учитывались результаты, полученные в [3], в которой установлена экспериментальная зависимость между скоростью съема $V_{\text{эпо}}$ и исходным радиусом заготовки r_n , описываемая формулой $V_{\text{эпо}} = 0,0013r_n^{-1,2315}$. Для этого подвергали обработке прутки исходного диаметра 1,5 мм, расположенный горизонтально на глубине 245 мм, в течение 180 мин, при этом через каждые 20 мин процесс останавливали и проводили измерения диаметра.

Целью исследования являлось установление продолжительности обработки, необходимой для полного удаления окалины, полирования (снижения параметра шероховатости) и придания поверхности образца однородного блеска, без существенного съема металла (не более 0,025 мм на сторону). Продолжительность обработки образцов изменялась в диапазоне от $t = 30$ с до $t = 270$ с с шагом $\Delta t = 30$ с. Для каждого образца выполнялись измерения наружного диаметра и параметра шероховатости поверхности. Диаметр образцов измерялся микрометром МК-25 (НПП «Челябинский инструментальный завод», РФ), параметр шероховатости поверхности – профилометром Marsurf PS1 («Mahr GmbH», ФРГ).

Результаты измерений представлены в табл. 1. Внешний вид обработанных образцов показан на рис. 2. Из представленных на рис. 2 фотографий видно, что

электролитно-плазменная обработка даже с минимальной продолжительностью ($t = 30$ с) приводит к существенному повышению качества поверхности.

Табл. 1. Результаты измерения диаметра и шероховатости поверхности образцов

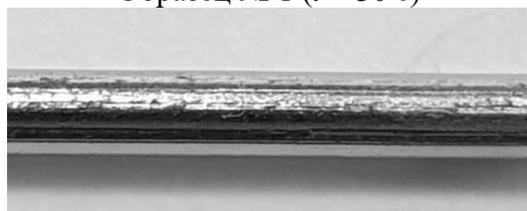
Номер образца	Время обработки t , с	Измеренный диаметр D , мм	Параметр шероховатости поверхности Ra , мкм
Исходный	–	1,69	0,288
1	30	1,68	0,288
2	60	1,68	0,218
3	90	1,68	0,196
4	120	1,68	0,179
5	150	1,68	0,201
6	180	1,68	0,140
7	210	1,67	0,168
8	240	1,67	0,125
9	270	1,67	0,101
10	300	1,66	0,085



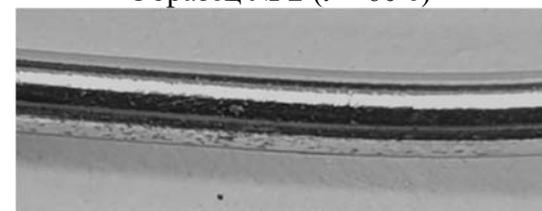
Образец № 1 ($t = 30$ с)



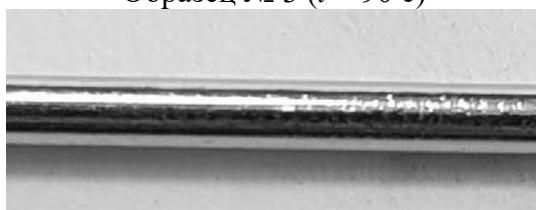
Образец № 2 ($t = 60$ с)



Образец № 3 ($t = 90$ с)



Образец № 4 ($t = 120$ с)



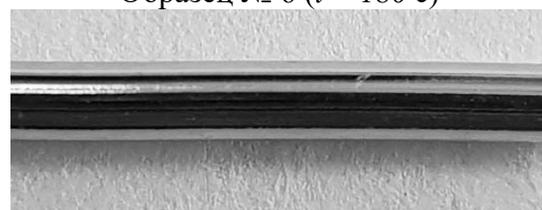
Образец № 5 ($t = 150$ с)



Образец № 6 ($t = 180$ с)



Образец № 7 ($t = 210$ с)



Образец № 8 ($t = 240$ с)

Рис. 2. Внешний вид образцов после электролитно-плазменной обработки ($\times 10$)

Однако при этом наблюдаются локальные точечные очаги окалины, которые полностью удаляются после обработки продолжительностью $t = 210$ с и больше. Таким образом, для полного удаления окалины и полирования необходима ЭПО поверхности продолжительностью $t = 210...240$ с. При этом съем металла составляет 0,01 мм на сторону, благодаря которому обеспечивается требуемый диаметральный размер с 7-м качеством точности наружных рабочих поверхностей УСКВТТ. Параметр шероховатости поверхности Ra уменьшается с 0,288 до 0,125...0,101 мкм.

Также ЭПО придает требуемый эстетичный вид поверхности изделия. Данный параметр оценивался измерением блеска поверхности после ЭПО. Образцы – пластины из стали 12Х10Н9 с размерами $25 \times 5 \times 1$ мм – закаляли с нагревом газовой горелкой при температуре $T = 1100$ °С...1150 °С в воду. Затем проводили ЭПО в течение $t = 240$ с (рис. 3).

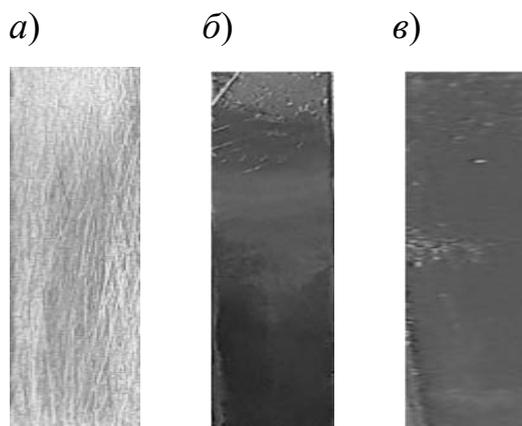


Рис. 3. Внешний вид поверхности образцов: *а* – исходный; *б* – после закалки; *в* – ЭПО ($\times 15$)

Для выполнения измерений применялись специально разработанные методика и приспособление. Результаты измерения блеска представляли в процентах (по отношению к эталону). Разработанная методика основана на измерении яркости параллельного пучка света, отражённого от исследуемой поверхности. Схема измерения представлена на рис. 4. В качестве источника света использовался лазерный светодиод, излучающий красный свет с длиной волны 635...670 нм с яркостью свечения 10 лм. Приемником света являлся фотодиод ВРW21. Яркость отраженного света определялась по выходному напряжению на фотодиоде. Эталоном взят плоский отражатель – оптическое стекло с алюминиевым напылением с отражательной способностью больше 99,5 %.

Для эталона напряжение на фотодиоде составляло $U = 100$ мВ. Принималось, что при таком значении напряжения блеск поверхности составляет $\theta = 100$ %. Соответственно, измеряемые значения блеска образцов из стали 12Х18Н9 в процентах определялись пропорционально полученному на выходе из фотодиода значению напряжения.

Напряжение на фотодиоде в эксперименте с исходным образцом без ЭПО составило $U = 2,4$ мВ, что соответствует блеску $\theta = 2,4$ %, а для образца после

ЭПО соответственно $U = 62$ мВ и $\theta = 62$ %. Структура поверхности этих образцов получена на микроскопе Altami MET1 (РФ) и представлена на рис. 5. Очевидно, что чем выше шероховатость поверхности, тем меньше её блеск.

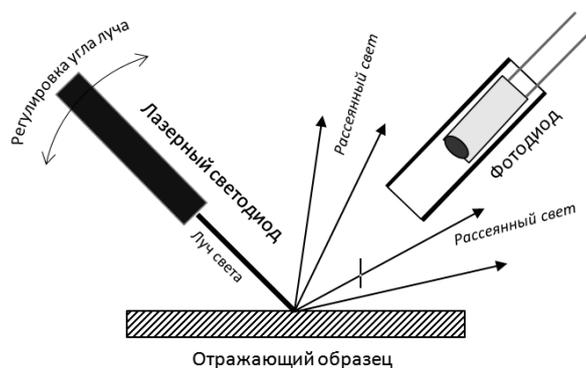


Рис. 4. Схема измерения блеска поверхности

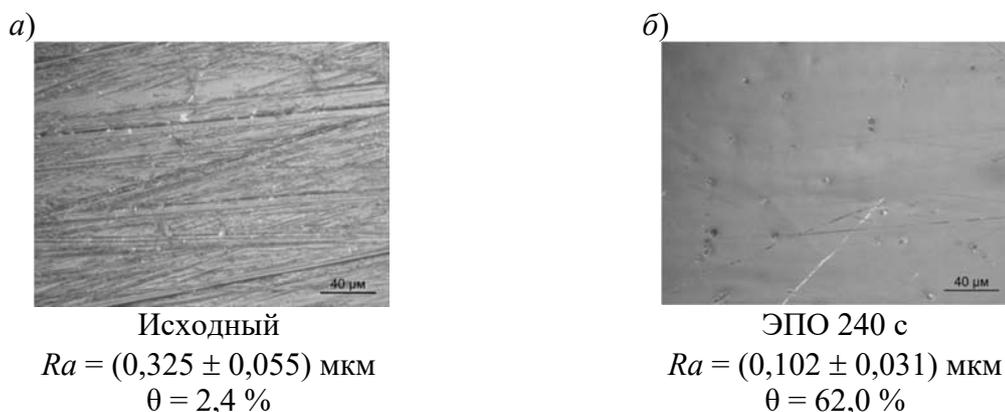


Рис. 5. Структура поверхности образца до (а) и после (б) ЭПО

УСКВТТ должен быть коррозионно-стойким в условиях эксплуатации, хранения и транспортирования. Исследования коррозионной стойкости выполнялись путем снятия поляризационных кривых в потенциодинамическом режиме. Для этого использовался потенциостат-гальваностат ПИ-50-Pro (ООО «Элинс», РФ) с подключенной электрохимической ячейкой. Потенциостат подключался к персональному компьютеру и управлялся специализированной программой PS Pack 2. Для получения поляризационных кривых использовалась трехэлектродная электрохимическая ячейка. Электрохимическая ячейка включала образец, являющийся рабочим электродом, и систему измерения, состоящую из вспомогательного платинового электрода марки ЭПВ-1СР-100, хлор-серебряного электрода сравнения и электролитического ключа. Измерения проводились в зоне образца размером 1 см^2 при комнатной температуре ($T = (20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$). При проведении исследований скорость изменения потенциала составляла $0,5 \text{ мВ/с}$. В качестве рабочего электролита использовался $0,9$ -процентный раствор NaCl в воде.

Потенциалы питтингообразования определялись из потенциодинамических кривых как потенциал начала резкого роста тока. Результаты представлены в табл. 2 в сравнении с образцом после шлифования.

Табл. 2. Потенциал коррозии $E_{корр}$, плотность тока коррозии $i_{корр}$, потенциал питтингообразования $E_{питт}$ исследованных образцов

Образец	$E_{корр}$, мВ	$i_{корр}$, А/см ²	$E_{питт}$, мВ
ОМД + ТО + шлифование	-176	$0,65 \cdot 10^{-8}$	+38
ОМД + ТО = ЭПО	-188	$0,22 \cdot 10^{-8}$	+392

Анализ потенциодинамических кривых показывает, что наибольшие значения потенциала питтингообразования $E_{питт}$ достигаются для образцов после ЭПО. Несмотря на относительно высокую плотность тока коррозии, образец после ЭПО обладает высоким потенциалом питтингообразования. Полученные результаты сравнительных испытаний свидетельствуют о достаточно высоких защитных свойствах поверхности, сформированной в результате ЭПО, которая способна надежно противостоять коррозии в условиях хранения, дезинфекции, стерилизации и эксплуатации изделия.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

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. Королев // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 4. – С. 180–187.
2. **Пояркова, Е. В.** Влияние высокотемпературного нагрева на структуру поверхностных окислов нержавеющей стали / Е. В. Пояркова, А. В. Яхин // *Вестн. Тамбов. ун-та. Сер. Естественные и технические науки*. – 2016. – Т. 21, вып. 3. – С. 1267–1270.
3. Особенности процессов размерной обработки металлических изделий электролитно-плазменным методом / Ю. Г. Алексеев [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2005. – № 4. – С. 188–195.
4. Комбинированная технология изготовления гибких ультразвуковых концентраторов-инструментов / Ю. Г. Алексеев [и др.]; под общ. ред. Б. М. Хрусталёва. – Минск: БНТУ, 2015. – 203 с.

Контакты:

y.g.aliakseyeu@gmail.com (Алексеев Юрий Геннадьевич);
 korolyov129@gmail.com (Королев Александр Юрьевич);
 dwq1616@163.com (Дай Вэньци).

YU. G. ALIAKSEYEU, A. YU. KOROLYOV, DAI WENQI

INFLUENCE OF ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT ON THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF THE SURFACE OF ULTRASONIC MEDICAL WAVEGUIDE

Abstract

The results of experimental studies of the influence of electrolytic plasma treatment on the condition of the working surfaces of ultrasonic stepped tubular waveguides are presented: dimensional accuracy, surface quality, gloss, roughness parameter Ra, and corrosion resistance. It is shown that the conditions for achieving the required 7th-grade of accuracy are met: there are no burrs, sharp edges or scale on the surface, the roughness parameter is reduced to $Ra = 0,1 \mu\text{m}$, gloss increases by 60 % and corrosion resistance increases.

Keywords:

dimensional accuracy, surface roughness and gloss, corrosion resistance, processing operations.