



УДК 621.357.7

**А.Ю. Королёв, В.А. Томило, В.С. Нисс**  
Белорусский национальный технический университет  
г. Минск, Республика Беларусь  
E-mail: korolyov129@gmail.com  
Дата поступления 10.10.2023

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРУБ

### Аннотация

Выполнены исследования особенностей электролитно-плазменной обработки внутренних поверхностей на примере цилиндрического отверстия конечной длины (внутренней поверхности трубы). Экспериментально установлено распределение плотности тока, характер анодных процессов, протекающих на различных участках внутренней поверхности, исследована морфология и качество обработки поверхности. В процессах ЭПО на внутренних поверхностях по мере удаления от границы открытого участка происходит уменьшение плотности тока и, соответственно, съема металла, что связано со снижением напряженности электрического поля. При этом наблюдается формирование до трех характерных зон: полированной, матовой и окисленной. Количество характерных зон и их протяженность определяются размерами и формой обрабатываемой внутренней поверхности. Формирование характерных зон связано с особенностями анодных режимов, протекающих на различных участках обрабатываемой поверхности (электролитно-плазменного, коммутационного и электрохимического), которые определяются электрическими условиями и возникающими самоорганизующимися гидродинамическими потоками. Полированная зона формируется на участке поверхности, соответствующей электролитно-плазменному режиму и коммутационному режиму с относительно высокой долей электролитно-плазменной составляющей (не менее 25–30 %). Матовая зона соответствует участку, на котором действует коммутационный режим с низкой долей электролитно-плазменной составляющей (менее 25 %). Окисленная зона соответствует электрохимическому режиму.

**Ключевые слова:** электролитно-плазменная обработка, поверхность, шероховатость, морфология, плотность тока, напряженность.

### Введение

Одним из прогрессивных методов повышения качества поверхности металлических изделий является электролитно-плазменная обработка (ЭПО), которая широко используется для полирования, удаления заусенцев и очистки изделий медицинского назначения, декоративных изделий, деталей машин и приборов, а также с целью с повышения физико-механических и химических свойств поверхности [1, 2, 3], подготовки поверхности для нанесения покрытий [4]. Другими направлениями применения технологии ЭПО являются: размерная обработка ответственных длинномерных изделий [5], обработка поверхности с це-

лью удаления инородных включений и снижения плотности дислокаций [6]. ЭПО имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными методами механического и электрохимического полирования. Преимуществом перед механическим полированием является возможность обработки изделий сложной формы. Важнейшим преимуществом метода по сравнению с традиционной электрохимической обработкой является использование гораздо менее агрессивных и токсичных электролитов. Так, при ЭПО в качестве электролитов используются водные растворы солей концентрацией не более 5 %.

В процессе ЭПО на съем металла оказывают влияние основные технологические

параметры, такие как напряжение температура электролита, глубина погружения изделия в электролит [7]. При этом важнейшим фактором, определяющим съем металла на различных поверхностях изделия, является его геометрия. Наиболее интенсивной обработке подвергаются выступающие поверхности, наружные конструктивные элементы изделия, заусенцы, острые кромки, а наименее интенсивная обработка происходит на внутренних поверхностях – в пазах, отверстиях, канавках. Кроме того, при обработке цилиндрических поверхностей на интенсивность обработки оказывает влияние радиус кривизны, при этом чем меньше радиус кривизны, тем выше скорость съема металла [8].

Как в процессах традиционной электрохимической обработки, так и при ЭПО съем металла определяется локальной плотностью тока. Локальная плотность тока  $i$  зависит от напряженности электрического поля  $E$  на рассматриваемом участке обрабатываемой поверхности и удельной электропроводности среды  $\sigma$ , через которую происходит ионный обмен (1) [9]. В случае традиционной электрохимической обработки такой средой является сам электролит, при ЭПО – тонкая парогазовая оболочка (ПГО), формируемая вокруг анода. Выражение (1) представляет собой закон Ома для электролитов:

$$i = E\sigma \quad (1)$$

Для традиционных электрохимических технологий с целью решения проблем обработки внутренних и труднодоступных поверхностей используют подачу электродов-инструментов в зону обработки и прокачку электролита. В качестве электродов-инструментов при этом применяют перфорированные катоды, через которые осуществляют подачу электролита, проволочные электроды или электроды специальной формы с отдельной подачей электролита в межэлектродную зону [10, 11]. Для процессов ЭПО такие методы являются неэффективными, поскольку протекание устойчивого электролитно-плазменного процесса возможно только при условии значительного превышения площади катода над площадью обрабатываемой поверхности анода [12, 13], что технически нереализуемо для

внутренних конструктивных элементов малых размеров. Кроме того, при использовании дополнительных катодов в процессе ЭПО из-за высокого напряжения существует вероятность электрического пробоя с оплавлением поверхностей анода и катода.

Для традиционных электрохимических процессов, реализуемых при низких напряжениях, широко используются экспериментальные и расчетные методы установления распределения плотности тока и напряженности электрического поля. К таким процессам также применимы методы численного моделирования, позволяющие с большой достоверностью устанавливать распределение плотности тока и, соответственно, съем металла на различных поверхностях обрабатываемой поверхности [14, 15]. В процессе ЭПО съем металла зависит от толщины ПГО, форма и размеры которой определяются параметрами обработки и могут динамично изменяться за счет воздействия интенсивных потоков электролита, а также за счет существенного изменения электрических условий на обрабатываемой поверхности. Поэтому из-за таких комплексных условий протекания процесса ЭПО наиболее приемлемым методом установления электрических условий при обработке внутренних поверхностей представляется экспериментальный.

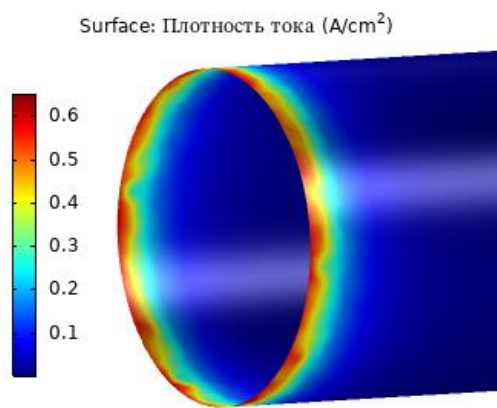
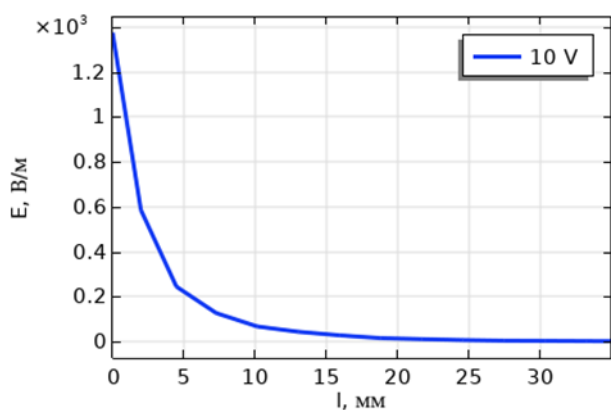
Исследование особенностей распределения плотности тока, определяющей съем металла, установление характера протекающих анодных процессов на различных участках внутренней поверхности, а также определение морфологии и качества их обработки являются важными теоретическими и прикладными задачами при разработке процессов ЭПО изделий сложной формы.

### Материалы и методы исследования

В качестве внутренней поверхности в работе рассматривалась поверхность сквозного цилиндрического отверстия ограниченной длины, наиболее простым примером которой является труба с изолированной внешней поверхностью.

На рисунке 1 представлены результаты численного моделирования распределения напряженности электрического поля и плотности тока на поверхности цилиндрического отверстия диаметром 28 мм в процессе традиционной электрохимической обработки. Удельную электропроводность электролита при расчетах принимали  $\sigma = 11,0 \text{ См/м}$ , что соответствует удельной электропроводности 5% раствора сульфата аммония при температуре 60°C. На внутренней поверхности при удалении от края отверстия линии напряженности ослабевают, что приводит к резкому уменьшению

как величины напряженности (рисунок 1а), так и плотности тока (рисунок 1б). Из результатов моделирования видно, что основной сьем металла происходит на участке поверхности, протяженностью около 5 мм. Однако, в процессе ЭПО из-за особенностей протекания электролитно-плазменного процесса за счет формирования трехфазной системы анод-ПГО-электролит, изменение напряженности на внутренней поверхности по мере удаления от края отверстия и, соответственно, распределение плотности тока и съема металла будет иметь иной характер.



а

б

Рисунок 1. Результаты численного моделирования процесса электрохимической обработки отверстия: а – изменение напряженности электрического поля на поверхности отверстия при удалении от ее края при различных значениях напряжения; б – распределение плотности тока на внутренней поверхности трубы при напряжении 10 В

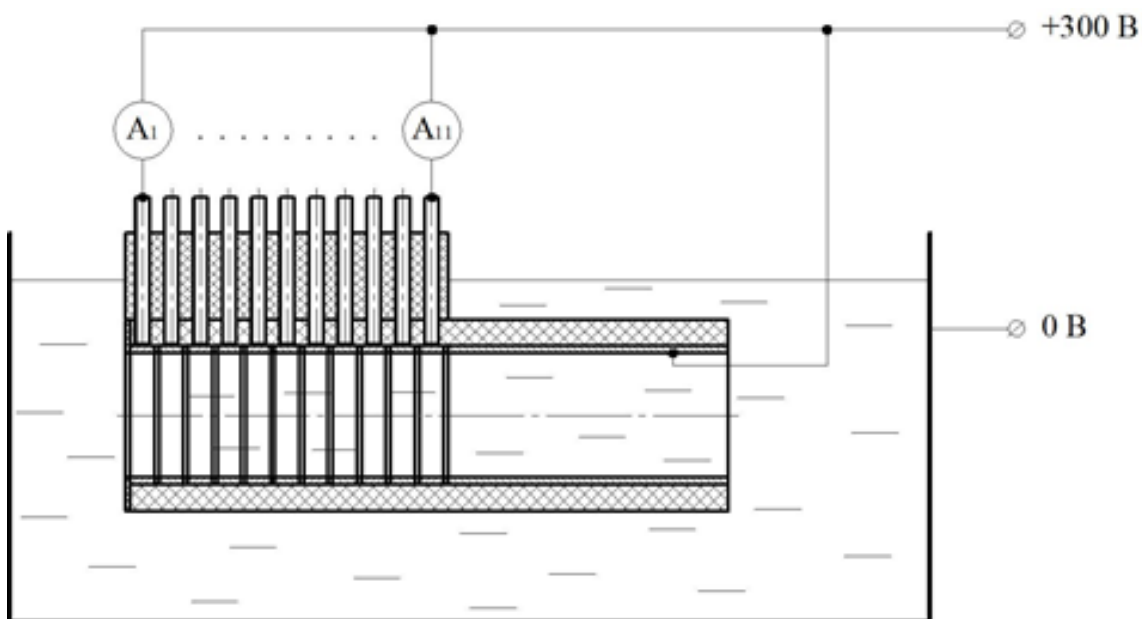


Рисунок 2. Схема электродного устройства

Для оценки неравномерности обработки выполнялась ЭПО отрезков труб с внутренним диаметром 1,5 мм; 3,8 мм; 6,0 мм; 9,5 мм; 12 мм; 16 мм; 18 мм и 28 мм длиной 125 мм из коррозионностойкой стали AISI 304. Для изоляции наружной поверхности от электролита образцы помещались во втулки из фторопласта. Обработка выполнялась в 5% водном растворе сульфата аммония при температуре 90°C. Напряжение обработки составляло 300 В. Для накопления достаточного количества продуктов обработки электролит был предварительно проработан при объемном количестве электричества 7 А·ч/л. Образцы при обработке были ориентированы продольной осью параллельно поверхности электролита. Общая продолжительность обработки образцов составляла 5 мин. Для нивелирования условий на различных поверхностях обработка выполнялась в два этапа. После первого этапа продолжительностью 2,5 мин образец поворачивался относительно продольной оси на угол 180°, после чего выполнялся второй этап продолжительностью 2,5 мин.

Для исследования закономерностей распределения тока и съема металла, а также особенностей анодных процессов на различных участках внутренней поверхности обрабатываемого образца было разработано электродное устройство, включающее 11 изолированных друг от друга кольцевых анодов из стали AISI 304 шириной 5 мм с внутренним диаметром 28 мм, помещенных внутрь трубы из полипропилена длиной 125 мм с толщиной стенки 6 мм (рисунк 2). Изоляция анодов друг от друга выполнялась с помощью колец из фторопласта шириной 1 мм. В свободной части трубы из полипропилена закреплялся отрезок трубы из стали AISI 304 с внутренним диаметром 28 мм длиной 59 мм. Аноды фиксировались в трубе из полипропилена шпильками М3. Шпильки также использовались для индивидуального токоподвода к каждому из анодов. Кроме того, для создания естественных условий обработки дополнительно поляризовался отрезок трубы длиной 59 мм. Обработка выполнялась в

5% растворе сульфата аммония с температурой 90°C при напряжении 300 В. Продолжительность обработки составляла 5 мин.

Для каждого из анодов через токоизмерительный шунт фиксировались осциллограммы тока в режиме временной развертки (для установления особенностей протекания анодных процессов), а также в режиме усреднения по результатам 16 циклов для определения среднего тока. Значение коэффициента горизонтальной развертки составляло 10 мс/дел. Плотность тока рассчитывалась как отношение силы тока к площади обрабатываемой поверхности анода. Кроме того, выполнялось измерение массы каждого анода до и после обработки. Дополнительно с использованием этого же электролита (при температуре 60°C) определялась плотность тока в режиме традиционной электрохимической обработки при напряжении 10 В.

Измерение параметра шероховатости Ra поверхности анодов выполняли с помощью профилометра MarSurf PS1. Масса анодов до и после обработки определялась на аналитических весах Ohaus Pioneer PA214. Микрофотографии характерных зон на внутренней поверхности получены с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA II LMU. Удельную электропроводность электролита измеряли кондуктометром HANNA HI8733. Осциллографические исследования выполнялись с помощью цифрового осциллографа OWON XDS 3102A.

### **Полученные результаты и их обсуждение**

Результаты изменения электрических условий на поверхности отверстия в процессе ЭПО могут быть наглядно продемонстрированы неравномерностью обработки участка, расположенного возле его края. На рисунке 3 представлены фотографии обработанных отрезков труб с внутренним диаметром 28 мм, 18 мм и 9,5 мм, разрезанных вдоль продольной оси. На фотографиях видно, что из-за большого градиента электрического поля на внутренней поверхности трубы в процессе ЭПО образуются характерные зоны.



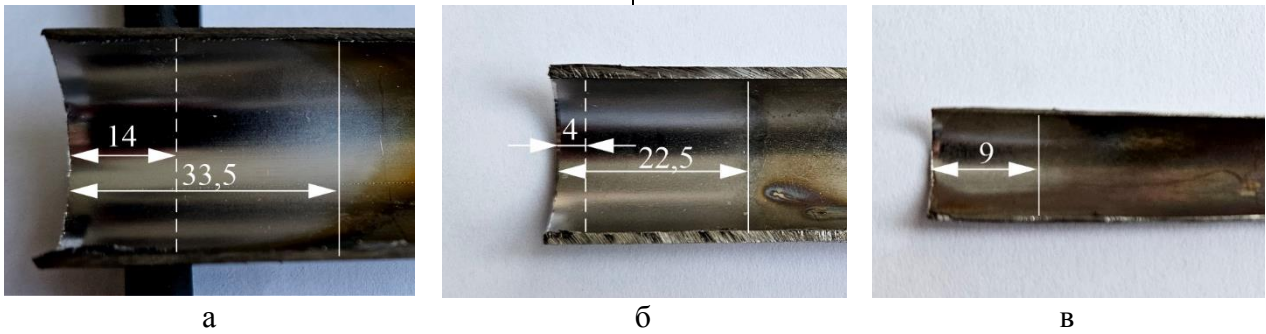
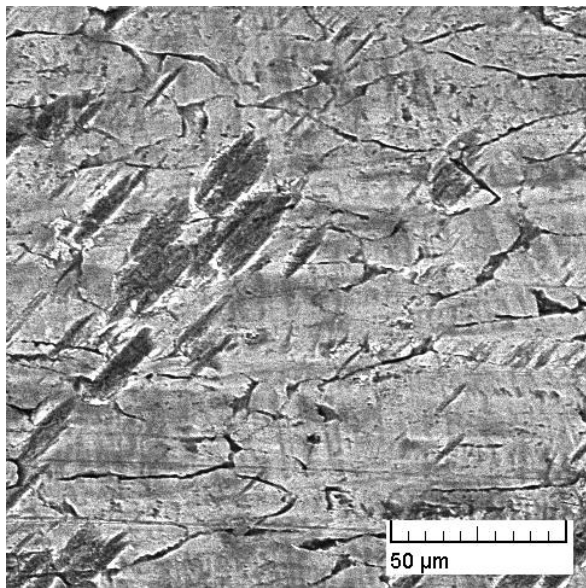
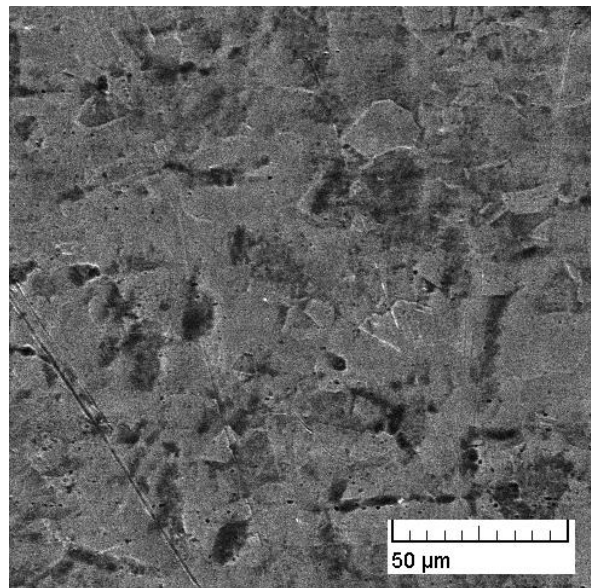


Рисунок 3. Состояние внутренней поверхности труб различного диаметра после ЭПО продолжительностью 5 мин: а – 28 мм; б – 18 мм; в – 9,5 мм



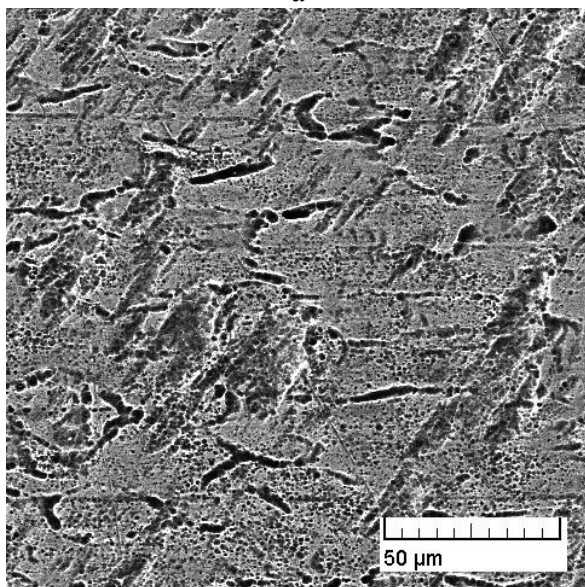
$Ra = 0,158$  мкм

а



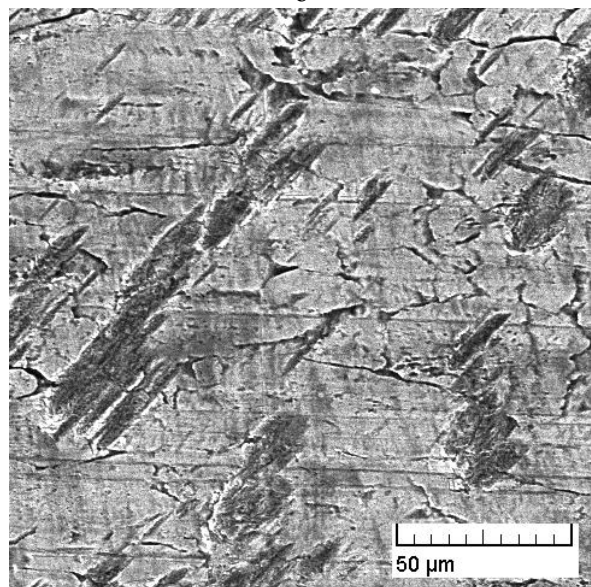
$Ra = 0,112$  мкм

б



$Ra = 0,187$  мкм

в



$Ra = 0,154$  мкм

г

Рисунок 4. Микрофотографии характерных зон на внутренней поверхности: а – исходная поверхность; б – полированная зона; в – матовая зона; г – зона с окислом

Вблизи от края образца формируется полированная зона с высоким коэффициентом отражения относительно исходного состояния. Такая поверхность свойственна для ЭПО. Протяженность полированной зоны снижается с уменьшением внутреннего диаметра обрабатываемого образца. Так для образца с диаметром 28 мм протяженность полированной зоны составляет 14 мм, а для образца с диаметром 18 мм ее величина уменьшается до 4 мм. На образцах с внутренним диаметром от 16 мм и менее полированная зона отсутствует. По мере удаления от торцевой поверхности полированная зона переходит в матовую (для образцов с диаметром 18 мм и 28 мм). На образцах без полированной поверхности матовая зона формируется, начиная с края образца. В матовой зоне преобладают процессы растравливания, свойственные для электрохимической обработки, выполняемой с отклонением от требуемых технологических режимов. Из-за растравливания качество поверхности в этой зоне снижается относительно исходного состояния. Существующие при этом электрические условия не позволяют сформироваться стабильной ПГО для протекания устойчивого процесса ЭПО. Кроме того, уменьшение диаметра образца приводит к нарушению свободного истечения гидродинамических потоков, что также является причиной срыва ПГО или нарушения ее сплошности. За матовой зоной, на поверхности осаждается окисная пленка, образующаяся вследствие обратного выделения растворенных в электролите продуктов обработки. Аналогичная пленка формируется при выполнении ЭПО частично погружаемого в электролит образца на участке поверхности, контактирующей с границей электролита.

Микрофотографии поверхности характерных зон (с указанием параметра шероховатости  $R_a$ ), формирующихся внутри трубы диаметром 28 мм приведены на рисунке 4. На исходной поверхности (рисунок

4а) присутствуют микротрещины и царапины, образованные в процессе производства трубы. Значение параметра шероховатости  $R_a$  исходной поверхности составляет 0,158 мкм. Поверхность полированной зоны имеет сглаженную структуру с выделенными границами зерен (рисунок 4б). При этом качество поверхности относительно исходного состояния повышается ( $R_a = 0,112$  мкм). Поверхность, соответствующая матовой зоне, имеет пористую структуру, сформированную скоплениями питтингов с размерами 1–2 мкм (рисунок 4в). Наряду с интенсивным питтингообразованием в этой зоне также происходит растравливание микротрещин, присутствующих на исходной поверхности, с увеличением их поперечных размеров. Качество поверхности в этой зоне ухудшается относительно исходного состояния ( $R_a = 0,187$  мкм). Морфология и шероховатость поверхности с окисной пленкой (рисунок 4г) соответствуют исходному состоянию.

Протяженность как отдельных зон, так и общая протяженность зон обработки со съемом металла (полированной и матовой) зависят от внутреннего диаметра образца. На рисунке 5 представлена зависимость общей протяженности зон (суммарная глубина обработки со съемом металла) образца  $l$  от его внутреннего диаметра. В исследованном диапазоне значений внутреннего диаметра представленная зависимость имеет строгий линейный характер. Суммарная глубина обработки для образца с внутренним диаметром 3,8 мм составила 0,8 мм. При этом для образца с диаметром 1,5 мм признаков обработки внутренней со съемом металла поверхности не наблюдалось. На поверхности присутствовал только осажденный окисный слой. Экстраполяция полученной зависимости показывает, что предельное значение внутреннего диаметра образца, при котором прекращается обработка внутренней поверхности составляет 3,2 мм.

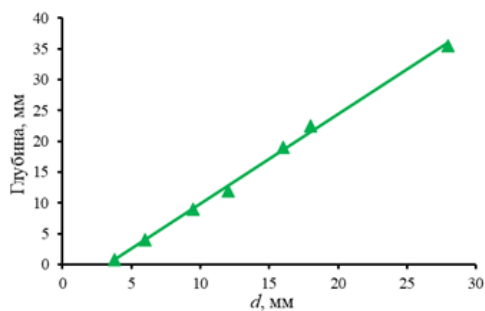


Рисунок 5. Влияние внутреннего диаметра образца на общую протяженность зоны обработки

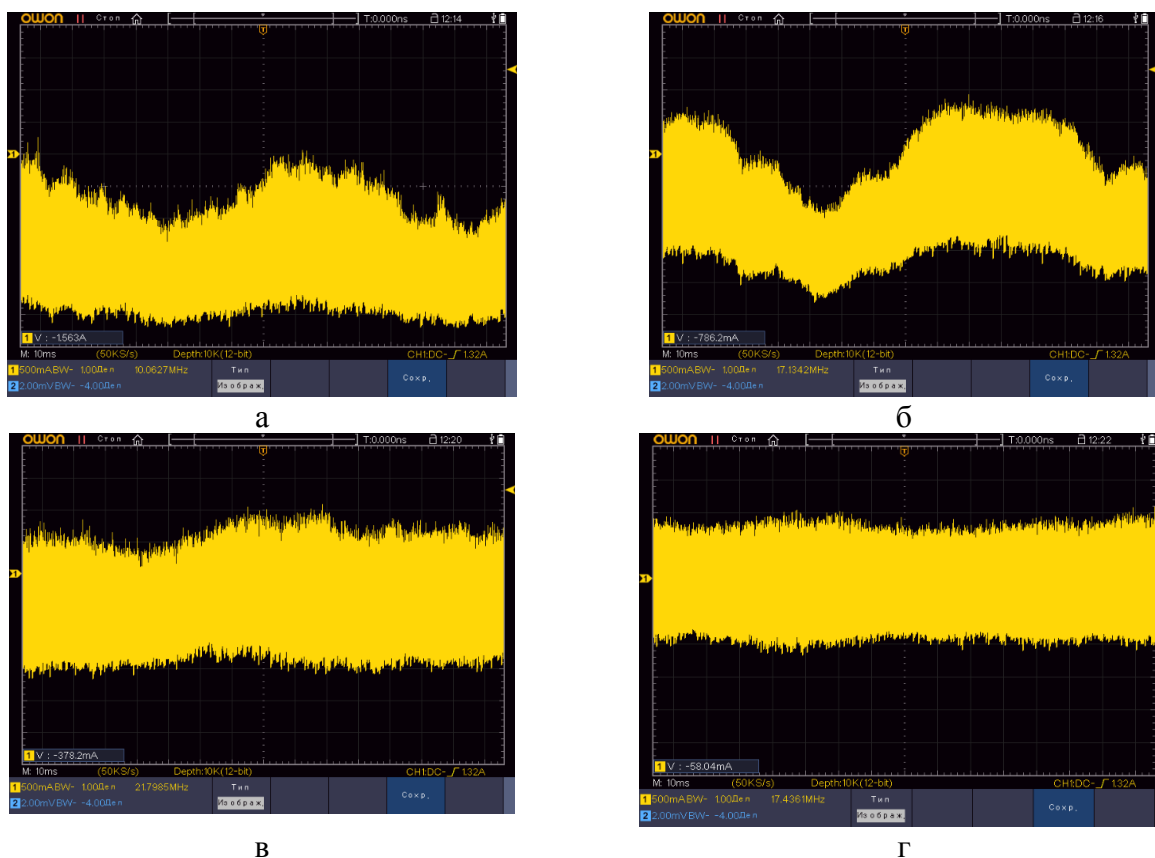


Рисунок 6. Примеры осциллограмм в режиме усреднения для определения среднего тока на анодах (отображение силы тока на осциллограммах инвертировано):

а – анод №2; б – анод №3; в – анод №5; г – анод №7

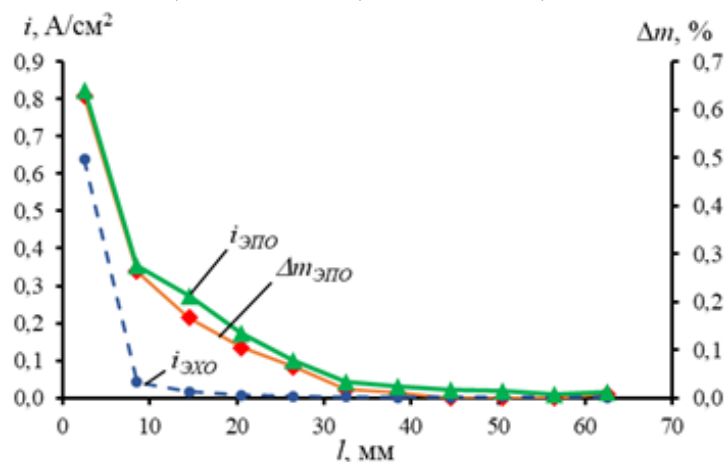


Рисунок 7. Распределение плотности тока и съема металла на внутренней поверхности по мере удаления от границы открытого участка



На рисунке 6 представлены примеры осциллограмм в режиме усреднения для определения среднего тока на анодах (нумерация анодов по мере удаления от края). Распределение плотности тока на различных участках внутренней поверхности по мере удаления от края, представлено на рисунке 7. На крайнем аноде плотность тока составляет  $0,81 \text{ А/см}^2$ . При удалении от края на расстояние 6 мм происходит интенсивное снижение его величины до  $0,34 \text{ А/см}^2$  (анод №2). Этот участок соответствует полированной поверхности. Относительно высокая плотность тока в зоне, соответствующей полированной поверхности, связана с наличием интенсивных гидродинамических потоков, приводящих к значительному уменьшению толщины ПГО. При дальнейшем удалении от края образца наблюдается плавное снижение плотности тока. Так на расстоянии 32 мм от края (анод №6) его величина снижается до  $0,005 \text{ А/см}^2$ . Этот участок соответствует растравленной поверхности. Далее происходит затухание анодного процесса – при удалении от края на расстояние более 32 мм плотность тока колеблется в диапазоне до  $0,001\text{--}0,013 \text{ А/см}^2$  (зона окисленной поверхности). Зависимость распределения съема металла на внутренней поверхности в процессе ЭПО коррелирует с зависимостью распределения плотности тока, что подтверждает корректность полученных результатов.

Распределение плотности тока на внутренней поверхности для электрохимического процесса  $i_{\text{ЭХО}}$  имеет другой характер по сравнению с установленным распределением для процесса ЭПО. Так при электрохимическом процессе уже при небольшом удалении от края образца (анод №2) происходит резкое снижение плотности тока с ( $0,63 \text{ А/см}^2$  до  $0,04 \text{ А/см}^2$ ), что хорошо согласуется с результатами численного моделирования, представленными на рисунке 16.

Существенные различия в характере распределения плотности тока в электролитно-плазменном и электрохимическом процессах связаны со спецификой изменения напряженности электрического поля на

внутренней поверхности обрабатываемого образца, а также комплексными процессами, сопровождающими процесс ЭПО. ЭПО выполняется при гораздо более высоком напряжении (300 В) по сравнению с традиционным электрохимическим процессом. Соответственно, напряженность электрического поля при ЭПО существенно выше, а ее снижение по мере удаления от края образца менее интенсивное. Кроме того, на среднюю плотность тока и съем металла при ЭПО существенное влияние оказывает нарушение сплошности ПГО вследствие резкого снижения напряженности на внутренней поверхности и воздействия на ПГО формирующихся гидродинамических потоков, что в результате приводит к повышению плотности тока.

Для установления особенностей протекания анодных процессов на различных участках обрабатываемой поверхности выполнены осциллографические исследования электрического тока (рисунок 8). Анализ полученных осциллограмм показывает, что протекающий через аноды ток включает как электролитно-плазменную, так и электрохимическую составляющие. Ток электролитно-плазменного режима определяется как отклонение средней линии высокочастотных осцилляций относительно нулевой линии осциллографа (рисунок 8а). На осциллограммах для анодов №1–5 присутствуют короткие прерывания электролитно-плазменного процесса длительностью 8–14 мс, приводящие к значительному повышению силы тока. Импульсное повышение тока связано с нарушением сплошности ПГО, в результате которого электролит соприкасается с анодом, что приводит к возникновению электрохимической составляющей. Такое состояние можно условно считать коммутационным режимом анодного процесса, который обычно возникает при значениях напряжения от 90 до 180 В, когда из-за периодического нарушения сплошности ПГО происходит хаотический рост тока, интенсивное паро- и газовыделение, возникновение гидродинамических потоков. В случае с обработкой внутренних поверхностей нарушение сплошности ПГО



связано не только со снижением напряженности, но и с воздействием на нее интенсивных самоорганизованных гидродинамических потоков, возникающих на обрабатываемой поверхности [16], выброса пара, брызг, неустойчивого движения электролита во внутреннем закрытом объеме.

На аноде №1 протекает преимущественно электролитно-плазменный режим с плотностью тока  $i_{\text{эпл}} = 0,70 \text{ А/см}^2$  при среднем значении  $i_{\text{1ср}} = 0,81 \text{ А/см}^2$ . Доля электролитно-плазменной составляющей в

средней плотности тока для анода №1 составляет 86%. Таким образом, исключительно электролитно-плазменный режим протекает только в приграничной зоне протяженностью менее 5 мм. Плотность тока электролитно-плазменной составляющей на аноде №2 –  $i_{\text{эпл}} = 0,14 \text{ А/см}^2$ , а его доля в средней плотности тока снижается до 41%. Для анода №3 доля тока электролитно-плазменного процесса снижается до 28%, для анода №4 – до 15%, а для анода №5 – до 8 %.

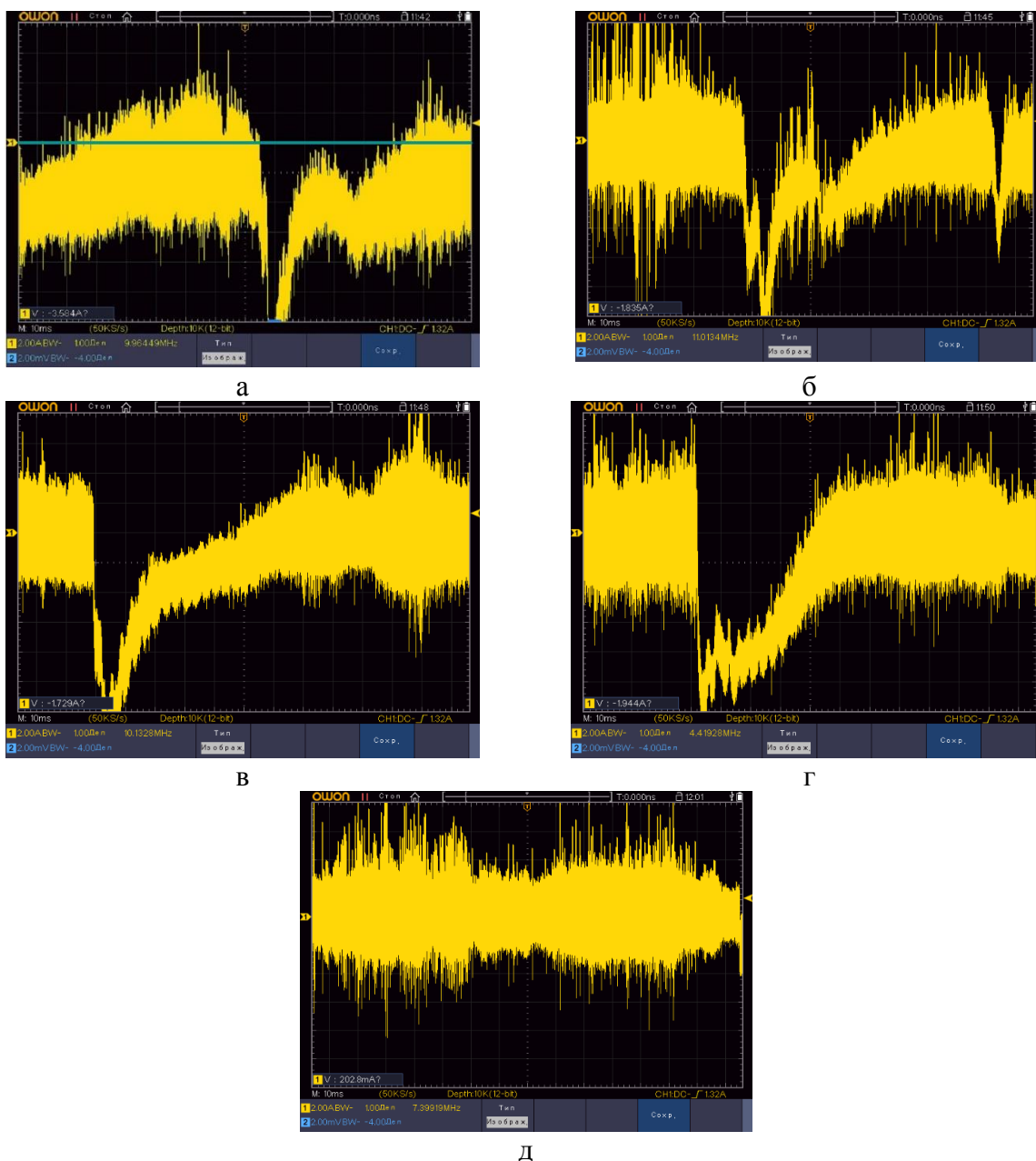


Рисунок 8. Осциллограммы тока на различных участках внутренней поверхности обрабатываемого образца с внутренним диаметром 28 мм (отображение силы тока на осциллограммах инвертировано): а – анод №1; б – анод №2; в – анод №3; г – анод №4; д – анод №5

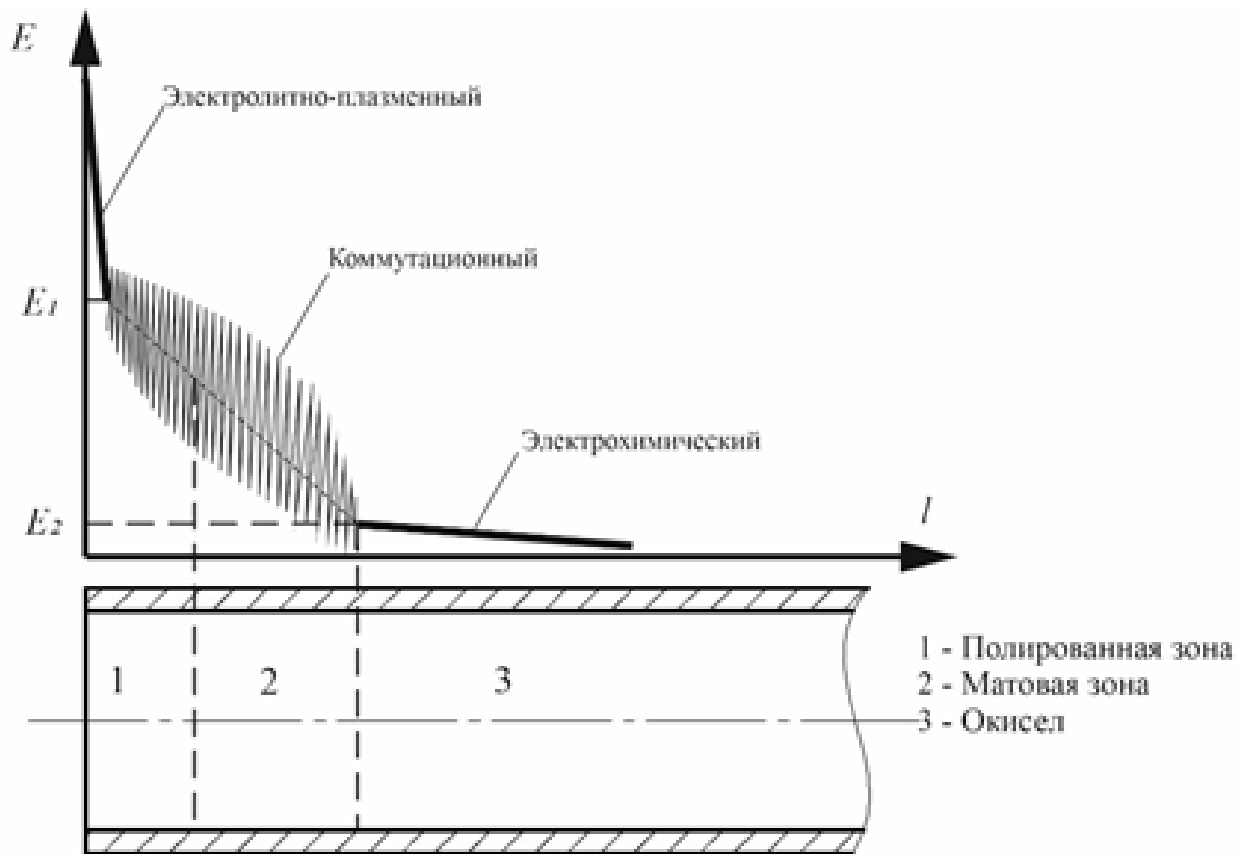
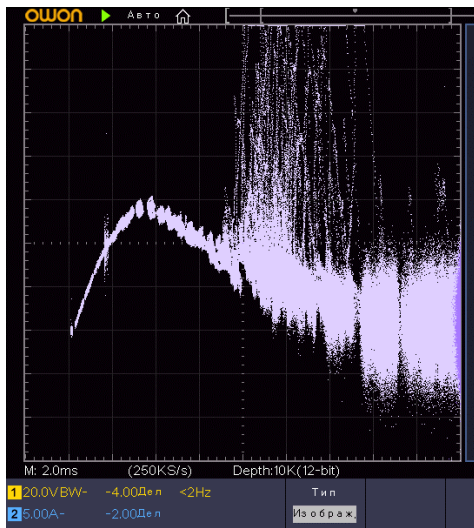
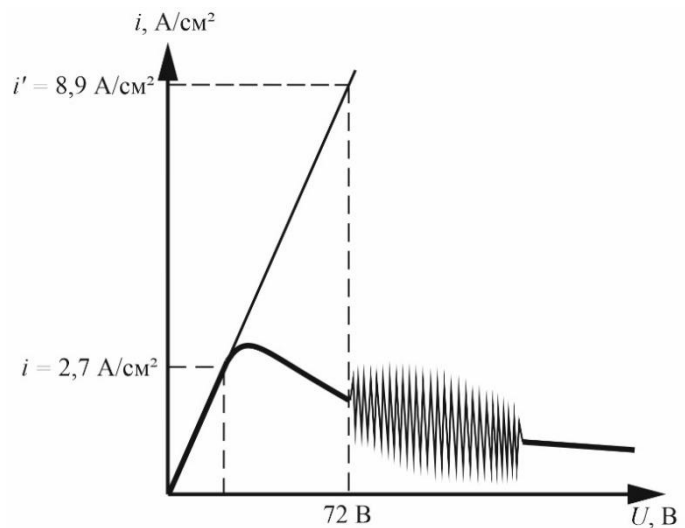


Рисунок 9. Связь пороговых значений напряженности электрического поля с границами характерных зон внутренней поверхности



а



б

Рисунок 10. Вольт-амперная характеристика анодного процесса при температуре электролита 90°C:

а – вольтамперная характеристика;

б – экстраполяция линейного участка вольтамперной характеристики

Согласно результатам, представленным на рисунке 3а, полированная зона находится в местах расположения анодов №1, № 2 и частично анода №3. Таким образом, можно утверждать, что полированная

зона формируется на участке поверхности, соответствующей электролитно-плазменному режиму и коммутационному режиму с относительно высокой долей электролитно-плазменной составляющей (не менее

25–30%). Матовая зона соответствует участку, на котором действует коммутационный режим с низкой долей электролитно-плазменной составляющей (менее 25%). Начиная с анода №6 (расстояние от края 32 мм) на осциллограммах фиксируется только высокочастотный сигнал с различной амплитудой без отклонения средней линии осцилляций от нулевого значения. Напряженность снижается до такого уровня, когда поляризация даже высоким напряжением (300 В) не приводит к образованию ПГО, и соответственно, к возникновению электролитно-плазменного режима на обрабатываемой поверхности. В этом режиме происходит осаждение окислов.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что необходимое значение напряжения является не единственным электрическим условием, обеспечивающим выделение в прианодной зоне энергии, достаточной для локального вскипания электролита, образования устойчивой ПГО и протекания стабильного электролитно-плазменного режима. Очевидно, что существуют также и пороговые значения напряженности  $E_1$  и  $E_2$ , при которых происходит переход между режимами анодного процесса. На рисунке 9 представлена условная диаграмма, демонстрирующая связь пороговых значений напряженности электрического поля с границами характерных зон при обработке внутренней поверхности. Протекание устойчивого электролитно-плазменного режима возможно только в краевой зоне. Снижение напряженности по мере удаления от края до порогового значения  $E_1$  вызывает прерывание сплошности ПГО с переходом процесса в коммутационный режим с хаотическим ростом тока, интенсивным паро- и газовыделением, возникновением гидродинамических потоков. Дальнейшее уменьшение напряженности до порогового значения  $E_2$  приводит к переходу процесса из коммутационного в электрохимический режим.

Для формирования устойчивой ПГО в прианодной зоне должен действовать тепловой поток, обеспечивающий существование устойчивой поверхности раздела жидкость–пар. Такое выделение тепла обеспе-

чивает прохождение через ПГО тока достаточной величины. Для протекания такого тока напряженность электрического поля должна иметь пороговое значение  $E_1$ , обеспечивающее эмиссию ионов электролита в ПГО и их перенос на анод [17]. По данным исследований различных авторов, [12, 13, 17] величина напряженности электрического поля в устойчивом электролитно-плазменном режиме составляет от  $10^6$  В/м до  $10^7$  В/м, а толщина ПГО согласно экспериментальным данным [18–20] оценивается в диапазоне от 3 до 250 мкм. Соответственно эти значения напряженности можно считать пороговыми значениями  $E_1$ , ниже которых возникает нарушение сплошности ПГО с переходом анодного процесса в коммутационный режим.

Пороговое значение напряженности  $E_2$ , при котором происходит переход из коммутационного в электрохимический режим можно оценить на основании анализа вольт-амперной характеристики анодного процесса. На рисунке 10а представлена вольт-амперная характеристика для анодного процесса в электролите на основе 5% раствора сульфата аммония с температурой 90°C. Удельная электропроводность такого электролита –  $\sigma = 14,8$  См/м. В качестве анода использовался плоский образец с размерами 30x5x1 мм из коррозионностойкой стали AISI 304. Вольт-амперные характеристики получены в режиме развертки напряжение-ток.

На начальном этапе электрохимического режима с увеличением напряжения происходит линейное увеличение силы тока. Повышение напряжения до критического значения приводит к возникновению интенсивного газовыделения на аноде, вследствие чего сопротивление в цепи электролит-анод повышается, а сила тока снижается. При этом очевидно, что несмотря на снижение плотности тока, повышение напряжения вызывает рост напряженности электрического поля в слое электролита, поскольку расстояние между анодом и катодом остается неизменным. На вольт-амперной характеристике коммутационному режиму соответствует область, в которой наблюдаются хаотичные броски тока, отоб-

ражаемые в виде скопления точек, формирующих вытянутые вертикальные структуры. Из рисунка 10а видно, что при температуре электролита 90°C переход процесса из электрохимического режима в коммутационный начинается при напряжении 72 В.

Нелинейное поведение электрохимического участка вольт-амперной характеристики не позволяет использовать закон Ома для электролитов (1) для определения порогового значения напряжения  $E_2$  при известном значении удельной электропроводности электролита  $\sigma$  и плотности тока  $i$ , соответствующей напряжению перехода процесса из электрохимического режима в коммутационный. С учетом того, что в электрохимическом режиме напряженность поля от напряжения имеет линейную зависимость, значение  $E_2$  можно установить по формуле (1), зная величину плотности тока  $i'$ , который действовал бы при напряжении перехода из электрохимического режима в коммутационный при линейном поведении электрохимического участка вольтамперной характеристики, то есть при отсутствии газовыделения на аноде. Плотность тока  $i'$  определяется путем экстраполяции линейного участка вольтамперной характеристики до напряжения перехода из электрохимического режима в коммутационный (рисунок 11б). Установленное по результатам экстраполяции значение  $i'$  составило 8,9 А/см<sup>2</sup>. В этом случае пороговое значение напряженности, при котором происходит переход из коммутационного в электрохимический режим,  $E_2 = 6,0 \cdot 10^3$  В/м.

Установленное пороговое значение  $E_2$  на 3–4 порядка меньше порогового значения  $E_1$ , соответствующего переходу между электролитно-плазменным и коммутационным режимами анодного процесса. Такое существенное различие в пороговых значениях связано с особенностями режимов обработки. В электролитно-плазменном режиме основное падение напряжения происходит в ПГО, имеющей небольшую толщину (3–250 мкм). Поэтому напряженность электрического поля в этом режиме принимает высокие значения. В электрохимическом режиме происходит плавное изменение потенциала в слое электролита между

анодом и катодом. В результате напряженность принимает низкие значения. В коммутационном режиме в каждой точке электрического поля имеет место постоянное изменение как вектора напряженности, так и его абсолютной величины в относительно широком диапазоне, соответствующем значениям от  $E_1$  до  $E_2$ .

### Заключение

1. В процессах ЭПО на внутренних поверхностях образцов труб по мере удаления от границы открытого участка происходит уменьшение плотности тока и, соответственно, съема металла, что связано со снижением напряженности электрического поля. При этом установленное снижение плотности тока при ЭПО менее интенсивное, чем при традиционных электрохимических процессах, выполняемых при низких значениях напряжения.

2. При ЭПО на внутренней поверхности образцов труб по мере удаления от границы открытого участка происходит формирование до трех характерных зон: полированной, матовой и окисленной. Количество характерных зон и их протяженность определяются размерами и формой обрабатываемой внутренней поверхности. На примере цилиндрического отверстия установлено, что при значении диаметра от 18 мм и более на внутренней поверхности происходит формирование всех трех зон, при диаметре от 16 мм и менее полированная зона отсутствует. Предельное значение диаметра, при котором формируется только окисленная зона, составляет 3,2 мм.

3. Формирование характерных зон связано с особенностями анодных режимов, протекающих на различных участках обрабатываемой поверхности (электролитно-плазменного, коммутационного и электрохимического), которые определяются электрическими условиями и возникающими самоорганизующимися гидродинамическими потоками. Полированная зона формируется на участке поверхности, соответствующей электролитно-плазменному режиму и коммутационному режиму с относительно высокой долей электролитно-плазменной составляющей (не менее 25–30 %). Матовая зона соответствует участку, на

котором действует коммутационный режим с низкой долей электролитно-плазменной составляющей (менее 25%). Окисленная зона соответствует электрохимическому режиму.

4. Переходам между режимами анодного процесса при ЭПО внутренних поверхностей соответствуют пороговые значения напряженности. Для исследованного режима ЭПО переход из электролитно-плазменного в коммутационный режим происходит при значении напряженности  $E_1 = 10^6 - 10^7$  В/м, переход из коммутационного в электрохимический режим – при значении  $E_2 = 6,0 \cdot 10^3$  В/м.

#### Библиографический список

1. Korolyov A., Bubulis A., Vėžys J., Aliakseyeu Yu., Minchenya V., Niss V., Markin D. (2021). Electrolytic plasma polishing of NiTi alloy. Mathematical models in engineering. Kaunas: JVE international. 2021, vol. 7, iss. 4, p. 70-80. ISSN 2351-5279. eISSN 2424-4627.
2. Aliakseyeu Y., Bubulis A., Korolyov A., Niss V. Kandrotaitė Janutienė R. (2021) Plasma Electrolyte Polishing of Titanium and Niobium Alloys in Low Concentrated Salt Solution Based Electrolyte. *Mechanika*, 27(1): 88–93. <http://dx.doi.org/10.5755/j02.mech.25044>
3. Plasma Electrolytic Polishing – An Overview of Applied Technologies and Current Challenges to Extend the Polishable Material Range / K. Nestler, F. Böttger-Hiller, W. Adamitzki, G. Glowa, H. Zeidler, A. Schubert // *Proceedings of the 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII)*, 8-22 April 2016, Tokyo, Japan, *Procedia CIRP* 42 (2016), pp. 503 – 507.
4. Vacuum deposited polymer and DLC multilayer coatings on austenitic steel, structure and tribotechnical properties in physiological solution / V.P. Kazachenko, N.I. Semchenko, A.N. Popov, Y.G. Alekseev A.Y. Korolyov // *International Conference on Industrial Tribology – India, Bangalore, 2006.* – P.55.
5. Алексеев Ю., Бубулис А., Королёв А., Минченя В., Нисс В., Паулюкас А. / Формирование конических изделий малого диаметра методом размерной электролитно-плазменной обработки // *Proceedings of the International Scientific Conference on Mobile Machines, Kaunas, Lithuania, September 20–22, (2017), pp. 47–54.*
6. Алексеев, Ю.Г. 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. №3. Серия В. Промышленность. Прикладные науки.* – 2012. – №11. – С. 85-90.
7. 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.
8. 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.
9. Зисман Г. А. Курс общей физики: учебное пособие для вузов: в 3 томах / Г. А. Зисман, О. М. Тодес. – 9-е изд., стер. – Санкт-Петербург: Лань, 2022. – Том 2: Электричество и магнетизм. – 360 с.
10. Химическая и электрохимическая обработка стальных труб. Липкин Я.Н., Штанько В.М. 2-е изд., перераб. и доп. М., "Металлургия", 1982.–254 с.
11. Амитан, Г.Л. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки // Г.Л. Амитан, И.А. Байсупов, Ю.М. Барон и др.; под. общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.
12. Синькевич, Ю.В. Электроимпульсное полирование сплавов на основе железа, хрома и никеля / Ю.В. Синькевич [и др.]. – Минск: БНТУ, 2014. – 324 с.
13. Куликов, И.С. Электролитно-плазменная обработка материалов / И.С. Куликов, С.В. Ващенко, А.Я. Каменев. – Минск: Беларус. Навука, 2010. – 232 с.



14. Каданер Л. И., Равномерность гальванических покрытий, Харьков, Изд. Харьков, гос. ун-та, 1960. 414 с.
15. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению /Ю.Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
16. Синькевич, Ю.В. Исследование самоорганизованных гидродинамических потоков в электролите в режиме электроимпульсного полирования / Ю.В. Синькевич, В.К. Шелег, И.Н. Янковский // Вестник полоцкого гос. ун-та. Серия В. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 66–72
17. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов и сплавов : в 2-х томах / И. Суминов [и др.] ; ред. И. Суминов. - М. : Техносфера, 2011. – Т. I. – 2011. – 463 с.
18. Дураджи В.Н. Некоторые особенности нагрева металлов в электролитной плазме при анодном процессе/В. Н. Дураджи, И. В. Брянцев // Электронная обработка материалов. – 1977. – № 1. – С. 45–48.
19. Лазаренко Б.Р. Об особенностях электролитного нагрева при анодном процессе/Б. Р. Лазаренко, В. Н. Дураджи, А. А. Факторович, И. В. Брянцев // Электронная обработка материалов. – 1974.– № 3. – С. 37–40.
20. Ганчар В.И. Анодное растворение железа в процессе электролитного нагрева / В. И. Ганчар, И. М. Згардан, А. И. Дикусар // Электронная обработка материалов. – 1994. – № 4. – С. 69–77.

---

*Information about the paper in English*

**A.Yu. Korolyov, V.A. Tomilo, V.S. Niss**  
 Belarusian National Technical University  
 Minsk, Republic of Belarus  
 E-mail: korolyov129@gmail.com  
 Receipt date: October 10, 2023

RESEARCH OF THE FEATURES OF ELECTROLYTE-PLASMA TREATMENT OF INNER SURFACES OF PIPES

**Abstract**

Studies of the features of electrolyte-plasma processing of internal surfaces have been carried out using the example of a cylindrical hole of finite length (the internal surface of a pipe). The current density distribution and the nature of the anodic processes occurring in various areas of the inner surface were experimentally established, and the morphology and quality of surface treatment were studied. In EPT processes on internal surfaces, as one moves away from the boundary of the open area, the current density and, accordingly, metal removal decrease, which is associated with a decrease in the electric field strength. In this case, the formation of up to three characteristic zones is observed: polished, matte and oxidized. The number of characteristic zones and their length are determined by the size and shape of the inner surface being processed. The formation of characteristic zones is associated with the peculiarities of anodic regimes occurring in various areas of the treated surface (electrolyte-plasma, switching and electrochemical), which are determined by electrical conditions and emerging self-organizing hydrodynamic flows. The polished zone is formed on a surface area corresponding to the electrolyte-plasma mode and switching mode with a relatively high proportion of the electrolyte-plasma component (at least 25–30%). The matte zone corresponds to the area in which the switching mode operates with a low proportion of the electrolyte-plasma component (less than 25%). The oxidized zone corresponds to the electrochemical regime.

**Keywords:** electrolyte-plasma treatment, surface, roughness, morphology, current density, intensity.

---