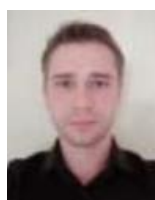


ЭЛЕКТРОЛИТНО-ПЛАЗМЕННОЕ ПОЛИРОВАНИЕ НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ СЛОЖНОГО ПРОФИЛЯ



¹Михаил Михайлович Радкевич,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого, Россия, Санкт-Петербург.
Тел: (812)552-93-02, E-mail: radmich@mail.ru



²Иван Сергеевич Кузьмичев
ЗАО Фирма «АНАГАЗ»
Россия, Санкт-Петербург
E-mail: Megavolt2020@yandex.ru

Аннотация

В статье представлены результаты освоения технологических процессов для реализации способа электролитно-плазменного полирования деталей из сталей, меди и ее сплавов, а также базовые принципы выполнения исследований в этой области и критерии применимости, позволяющие определить целевое направление и область использования электролитно-плазменного полирования в машиностроении при решении специальных задач повышения качества поверхностей деталей.

Ключевые слова: технология, оборудование, приспособление, деталь, потенциал, электролит, плазма, полирование, шероховатость, критерии, режимы, концентрация, температура, поток, электрод, эквидистантный, локальный.

Введение

Несмотря на то, что имеется значительное количество работ, посвященных исследованию технологии обработки прецизионных поверхностей ответственных деталей методом электролитно-плазменного полирования в условиях лабораторий, они, тем не менее, не находят широкого применения в промышленных условиях. Это объясняется

отсутствием завершенных проектов разработки и эксплуатации специального оборудования для реализации данного метода финишной обработки на промышленных предприятиях. К оборудованию предъявляются особые требования, одним из которых является автоматизация технологического процесса обработки с целью обеспечения необходимого уровня производственной безопасности. Кроме того, для достижения целевого уровня качества полирования поверхностей ответственных деталей критически важно соблюдать ряд технологических режимов. В этой связи стоит вопрос оценки области применимости данной технологии. Критериями оценки возможности применения электролитно-плазменного полирования (ЭПП) для финишной обработки поверхностей деталей из различных материалов и сплавов являются условия, обеспечивающие стабильность протекания процесса в заданном диапазоне параметров технологического процесса при реализации выбранной схемы обработки.

Методы

В работе, при проектировании, использовался «КОМПАС-3D». Для исследования и проведения опытных работ использовалась разработанная экспериментальная установка «ЭЭПП-100», позволяющая посредством применения специальных приспособлений реализовать ЭПП по различным схемам обработки.

Результаты

Основные требования и критерии оценки применимости технологии ЭПП.

Определение основных требований и критериев оценки возможности применимости ЭПП является принципиально важной задачей проектирования технологических процессов и установления основных параметров и режимов обработки, которые определяются выбором той или иной схемы реализации ЭПП. При этом, учитывается состав используемого электролита, а также геометрия (конфигурация) обрабатываемых поверхностей и материал обрабатываемой детали.

Следовательно, для реализации финишной обработки поверхностей деталей методом ЭПП требуется определить из какого материала изготовлена деталь, ее габаритные размеры, а также назначить те поверхности, которые будут использованы в качестве технологических баз и мест подвода электрического потенциала. Это имеет значение при выборе состава электролита, источника постоянного тока необходимой мощности и способа крепления детали в приспособлении.

Успешное решение поставленной задачи требует базового понимания области применения выбранной технологии в которой обеспечивается

стабильный процесс полирования. Ключевым критерием получения высокого качества обработки является выбор подходящей схемы реализации ЭПП под заданную номенклатуру деталей определенной геометрии, что в свою очередь позволит оценить возможность её применения и определить основные параметры технологического процесса, а также область, их рабочих значений [1,2].

Таким образом, при проектировании (разработке) технологического процесса важно понимать, какие результаты принципиально могут быть достигнуты при выборе той или иной схемы реализации ЭПП.

Рассмотрим несколько вариантов применимости ЭПП:

1. Технологический процесс ЭПП по схеме погружения обрабатываемой детали в ванну с электролитом.

Необходимо полировать две заготовки для изготовления термопары «хромель-копель». Одна заготовка из медноникелевого сплава «копель» МНМц 43-0,5, а другая из хромоникелевого сплава «хромель» НХ 9,5. Обрабатываемые наружные поверхности заготовок представляют собой простую конфигурацию, при этом площадь поверхностей каждой заготовки не превышает (S) 15 см².

Такого типа задачи, удовлетворяют условиям (критериям), которые в полной мере позволяют осуществить широко применяемый в настоящее время доступный технологический процесс ЭПП, который заключается в полировании деталей методом погружения в ванну с электролитом (рис.1).

Реализация данной схемы не требует использования специального оборудования и приспособлений, при этом обработка осуществляется при стабильном протекании процесса полирования в широком диапазоне варьирования основных параметров, что обеспечивает простоту достижения требуемых показателей качества обработки [3,4].

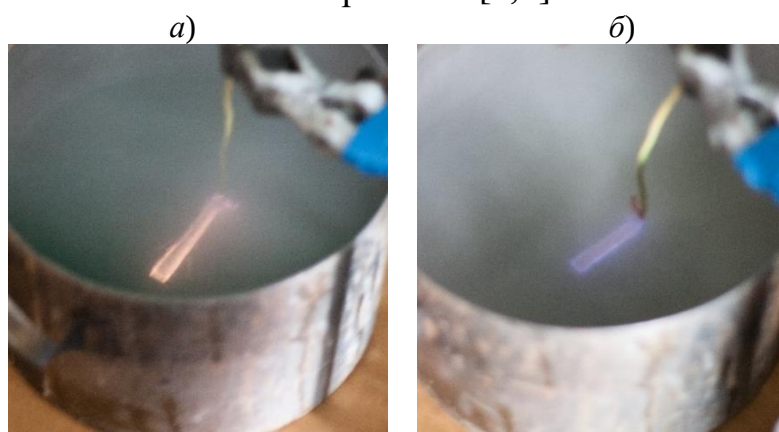


Рис. 1. Реализация технологического процесса ЭПП с погружением заготовок в электролит. а) полирование заготовки из сплава МНМц 43-0,5; б) полирование заготовки из сплава НХ 9,5.

Процесс ЭПП деталей из указанных материалов осуществляется в электролите, который представляет собой водный раствор с массовой долей сернокислого аммония (n) в пределах от 3 % до 5 %.

Примечание. Добавление в состав лимонной кислоты в количестве 0,05 % позволяет расширить область применения для полирования деталей из материалов согласно табл. 1.

Таблица 1. Состав электролита и материал деталей.

Компоненты электролита	Массовая доля компонентов, %	Материал детали
H ₂ O	96,95	Сталь 12X18H10 Медь М1, М2, М3 Латунь Л96, Л63
(NH ₄) ₂ SO ₄	3	
C ₆ H ₈ O ₇	0,05	

В предложенном электролите процесс ЭПП протекает при плотности тока (j), равной 0,7 А/см². Значение напряжения (U) может находиться в диапазоне от 250 В до 320 В, а температура электролита (Т) в диапазоне от 70 °С до 90 °С.

Требуемая мощность (N, Вт) источника питания рассчитывается по формуле:

$$N = U \cdot I \cdot K, \quad (1)$$

где I – потребляемый ток, А; K = 2 – коэффициент пусковых токов.

Потребляемый ток рассчитывается по формуле:

$$I = j \cdot S \quad (2)$$

Соответственно, требуемая минимальная мощность, с учетом двукратного запаса, равна 6300 Вт для ЭПП одной заготовки с заданными техническими параметрами.

На рис. 2 представлена зависимость целевого параметра шероховатости (Ra) от двух основных варьируемых параметра, концентрации (n) и температуры (Т) электролита, оказывающих наиболее влияние на процесс полирования наружных поверхностей.

Таким образом, рациональная область применения ЭПП в которой протекает стабильный процесс обработки деталей и сопровождается снижением параметра шероховатости Ra определяется следующими значениями режимов обработки: напряжение (U) от 250 до 320 В, концентрация электролита (n) от 3 до 5 %, температура электролита (Т) от 70 до 90 °С. Потребляемый ток, рассчитываемый по формуле 2.

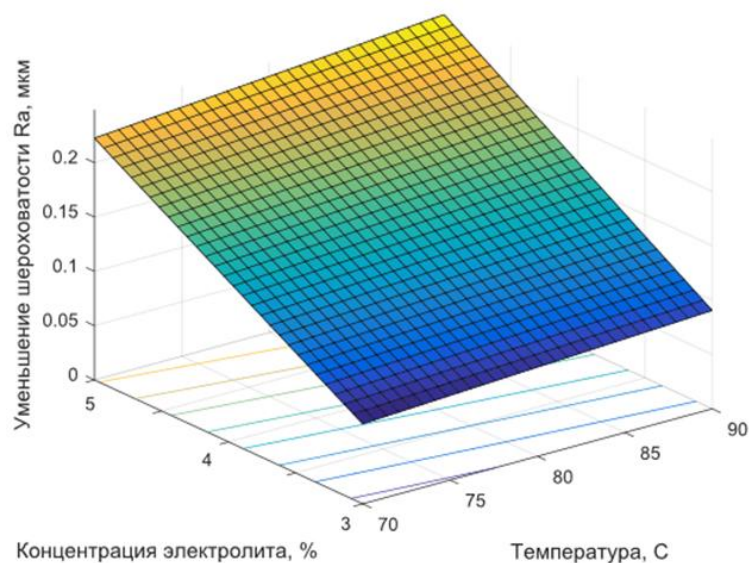


Рис. 2. График зависимости целевого параметра шероховатости (R_a , мкм) от концентрации (n , %) и температуры электролита (T , °C).

В заданном интервале значений параметров режимов технологического процесса ЭПП обеспечивается процесс полирования деталей при исходной шероховатости поверхности $R_a = 0,32$ мкм до шероховатости поверхности $R_a 0,23 - 0,06$ мкм.

При исходной шероховатости $R_a = 0,63$ мкм, достигается снижение параметра $R_a = 0,32$ мкм, при исходной шероховатости $R_a = 0,16$ мкм снижается до $R_a = 0,01$ мкм.

2. Технологический процесс ЭПП по схеме принудительной подачи электролита в зону полирования и размещением электрода в обрабатываемом отверстии.

При производстве деталей с отверстиями появляется необходимость полирования внутренних поверхностей в таких изделиях, как трубки топливных систем, цилиндры поршневых приводов, детали волноводной техники, оружейных стволов и т.п.

В этом случае, рассмотренный выше технологический процесс ЭПП не может быть применим, в силу условий и особенностей механизма, физических явлений, которые протекают при обработке внутренних поверхностей сквозных отверстий.

Одним из основных условий реализации схемы принудительного ЭПП (ПЭПП) для поверхностей сквозных отверстий является образование пароплазменной оболочки (ППО) в межэлектродном зазоре (МЭЗ), что необходимо для стабильного протекания процесса полирования. При этом, первостепенное влияние оказывает характер кипения электролита на поверхности обрабатываемой детали. Эксперименты показали, что при обработке детали, в МЭЗ, на внутренней обрабатываемой поверхности

наблюдается два вида кипения электролита - пузырьковое или пленочное. Установлено, что процесс полирования при ПЭПП обеспечивается в случае пленочного кипения электролита, при котором осуществляется устойчивое и равномерное расплавление микровыступов поверхности обрабатываемой детали. В противном случае происходит прожигание поверхностного слоя из-за появления в МЭЗ единичных электрических разрядов, которые при определенных условиях, переходят в электрическую дугу [5, 6].

Таким образом, для обеспечения в зоне обработки пленочного кипения и, как следствие, стабильного протекания процесса ПЭПП, необходимо обеспечить условия для создания в области гальванического экранирования уровня напряженности и плотности тока, достаточных для ионизации электролита. Кроме того, интенсивность нагрева, то есть скорость повышения температуры потока электролита, прокачиваемого в МЭЗ, должна удовлетворять условию, при котором обеспечивается тепловой баланс.

Рассмотрим пример полирования внутреннего диаметра трубки изготовленной из меди марки МЗ. Внутренний диаметр трубки (d) 16 мм, длина (L) 100 мм.

Медь марки МЗ полируется в среде электролита (табл. 1). При этом, оптимальной концентрацией электролита при полировании меди $n = 3 \%$.

Для подключения электрического потенциала в область гальванического экрана, а также подачи электролита в МЭЗ разработано специальное приспособление, чертеж которого показан на рис. 4, а на рис. 5 конструкция приспособления. Данная конструкция обеспечивает надежное крепление заготовки, подачу электролита в обрабатываемое отверстие и поддерживает заданный уровень напряженности электрического поля благодаря электрод-катоде (ЭК), размещенного эквидистантно вдоль оси полируемого отверстия детали [7].

Диаметр ЭК выбирается исходя из представленного соотношения

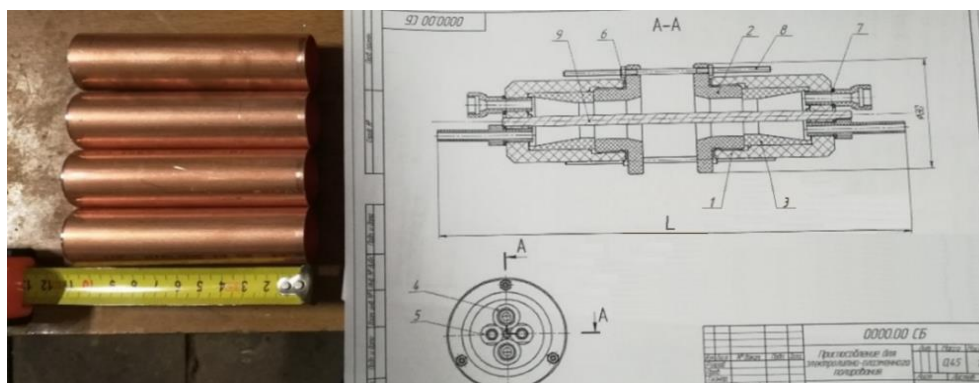
$$\frac{d_{\text{отв}}}{D_{\text{катода}}} = \frac{8}{3}.$$


Рис. 3. Детали-образцы из меди марки МЗ и чертеж приспособления.



Рис. 4. Приспособление в сборе с деталью-образцом.

Расчетные значения тока I , А, исходя из площади обрабатываемой внутренней поверхности детали, находим по формуле (2), затем определяем затрачиваемую мощность по формуле (1) без учета коэффициента запаса на пусковые токи.

Следовательно, $I = 35,2$ А; $N = 10550$ Вт.

Определяем эквивалент тепловой энергии исходя из затраченной мощности электрической энергии при условии, что 1 Вт равен 1 Дж/с. Тогда выделившееся количество тепловой энергии (Q , Дж) будет равно 10550 Дж/с. Исходя из количества тепловой энергии, которая преобразуется из электрической за одну секунду, записываем уравнение теплового баланса и переходим к его решению.

$$Q = C \cdot m \cdot \Delta T \quad (3)$$

где, m – масса, кг; C – удельная теплоемкость, Дж · кг · °С;

ΔT – разница между начальной температурой и температурой кипения.

На рис. 5 представлена расчетная схема определения объема полости обрабатываемого отверстия детали, в котором находится электролит.

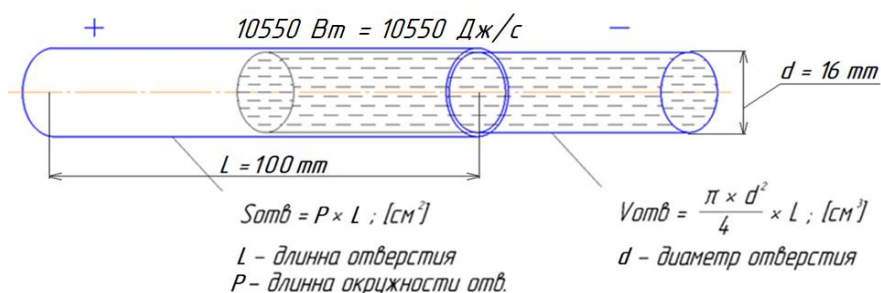


Рис. 5. Расчетная схема и характеристики зоны обработки.

Зная плотность и теплоемкость электролита определяем какое количество тепловой энергии потребуется, чтобы данный объем электролита нагреть до кипения при условии, что температура электролита на входе в обрабатываемое отверстие 70 °С, а температура кипения 100 °С, получаем $\Delta T = 30$ °С. Расчетный объем канала детали равен 20 см³ (0,021 кг).

Зная объем канала, плотность электролита $\rho = 1,05 \text{ г/см}^3$, разность температур $\Delta T = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ и теплоемкость $C = 4100 \text{ Дж}\cdot\text{кг}\cdot^\circ\text{C}$, по уравнению (3) определяем количество теплоты, необходимое для нагрева объема электролита в канале до температуры кипения за одну секунду, таким образом $Q = 2585 \text{ Дж}$.

Для стабильного протекания процесса ПЭПП внутренней поверхности трубки диаметром 16 мм и длиной 100 мм затрачивается 10550 Вт электрической энергии, эквивалентной такому же значению тепловой энергии.

Соответственно, чтобы температура электролита объемом 0,02 л находилась в пределах, при которых будет иметь место пленочное кипение, необходимо прокачивать объем электролита в четыре раза больший, соответственно $v = 0,08 \text{ л/с}$.

Зная, что скорость потока электролита при постоянном расходе зависит от поперечного сечения межэлектродного зазора и учитывая гидравлические потери в МЭЗ расход необходимо увеличить на 25 %, согласно формуле расчета скорости потока (4).

$$v_{\text{эл}} = v \cdot 1,25 \quad (4)$$

Экспериментально подтверждено, что процесс пленочного кипения электролита нарушается при выборе значения параметра скорости потока без учета потерь в МЭЗ. При этом увеличение скорости потока более чем на 50 % относительно расчетной величины приводит к срыву ППО в МЭЗ. В том и другом случае будет иметь место нарушение стабильности процесса, что приводит к браку (рис. 6 (в, г)).

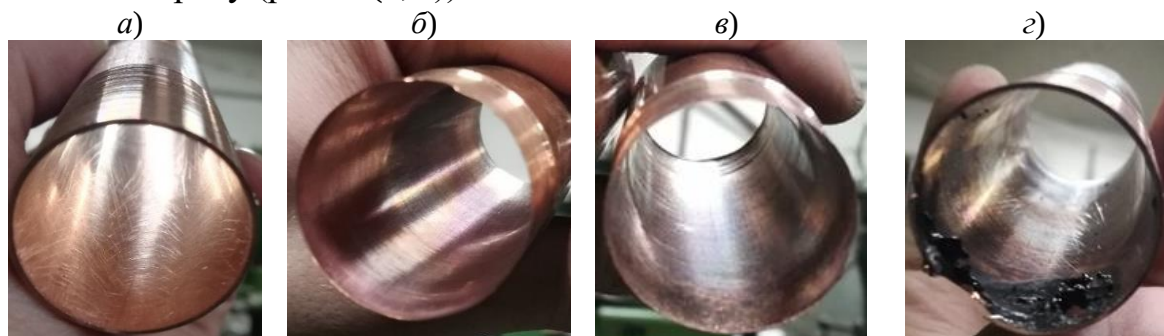


Рис. 6. (а) детали-образцы до полирования; (б) детали-образцы после обработки при рациональных режимах; (в) при срыве ППО, (г) при пузырьковом кипении и пробое МЭЗ.

Определение величины расхода электролита и выбор такой скорости потока — $v_{\text{эл}}$, при которой электролит будет находиться в состоянии пленочного кипения в МЭЗ, между поверхностью анода-заготовки и электродом-катодом, возможно по формуле:

$$v_{\text{эл}} = P_{\text{отв.}} \cdot L \cdot \frac{j \cdot U}{C \cdot \rho_{\text{раб.ж.}} \cdot \Delta T} \cdot 1,25 \quad (5)$$

где $P_{\text{отв}}$ – периметр обрабатываемого отверстия [см]; L – длина отверстия [см]; C – теплоемкость электролита [Дж/кг·°C]; ρ – плотность электролита [г/см³];

j – плотность тока [А/см²]; U – напряжение [В]; ΔT – разница температур электролита на входе в обрабатываемое отверстие и температурой кипения [°C].

На рис. 7 приведен фрагмент съемки процесса полирования деталей-образцов по схеме ПЭПП. Внутренняя поверхность с начальной шероховатостью $Ra = 0,32$ мкм (рис. 6, а) подвергались обработке ПЭПП при варьировании основных параметров процесса, влияющих на целевой параметр шероховатости внутренней поверхности.



Рис. 7. Процесс ПЭПП внутренней поверхности детали-образца.

На рис. 8 приведено графическое представление изменения целевого параметра шероховатости (Ra) в зависимости от концентрации (n) и скорости потока ($v_{\text{эл}}$) электролита, оказывающих наиболее влияние на процесс полирования отверстий.

Таким образом, протекание стабильного процесса ПЭПП, сопровождающегося снижением параметра Ra обрабатываемых внутренних поверхностей деталей, обеспечивается при следующих технологических режимах: напряжение (U) от 250 до 320 В, концентрация электролита (n) от 3 до 5 %, температура электролита (T) от 70 до 90 °C, скорость потока ($v_{\text{эл}}$) от 0,1 до 0,2 л/с. Потребляемый ток, рассчитываемый по формуле 2.

В заданном интервале значений параметров режимов технологического процесса ПЭПП обеспечивается процесс обработки внутренних поверхностей деталей при исходной шероховатости поверхности $Ra = 0,32$ мкм до шероховатости поверхности Ra 0,23 - 0,06 мкм. Уменьшение параметра шероховатости обрабатываемых поверхностей Ra в интервале 0,23 - 0,06 мкм можно достичь вследствие снижения концентрации электролита с 5 до 3 %, а скорости потока электролита с 0,2 до 0,1 л/с соответственно. Температура электролита на входе полируемого отверстия 70 °C.

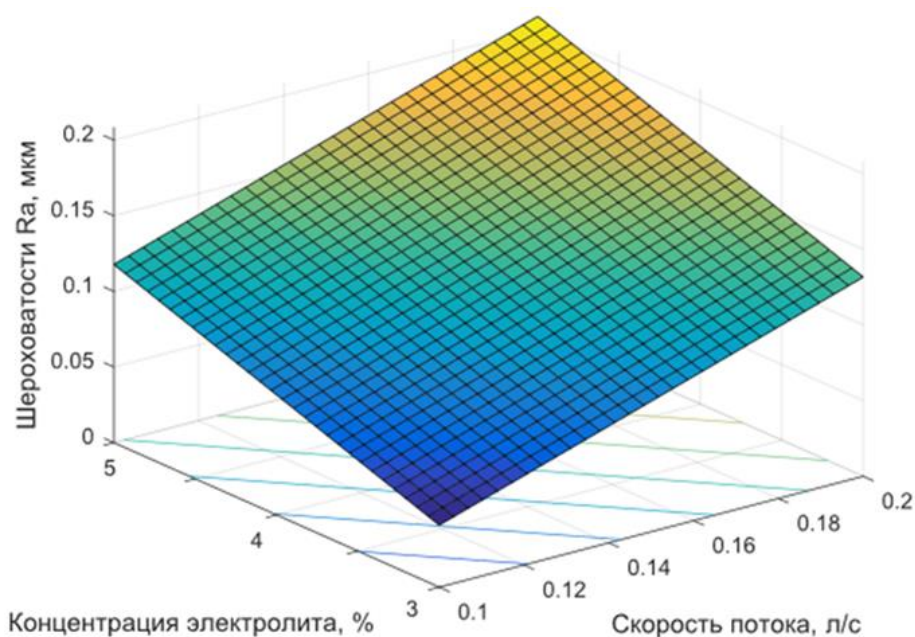


Рис. 8. График зависимости целевого параметра шероховатости (R_a , мкм) от концентрации (n , %) и скорости потока электролита ($v_{эл}$, л/с).

Соответственно, рациональной областью применения схемы ПЭПП внутренних поверхностей отверстий деталей с отношением длины к диаметру $L < 6d$ ограничиваются следующими значениями параметрами режимов технологического процесса: $U = 300$ В, $T = 70$ °С, $n = 3$ %, $v_{эл} = 0,1$ л/с. Потребляемый ток I , рассчитывается по формуле 2. Состав электролита выбирается с учетом материала обрабатываемой детали, согласно табл. 1.

3. Технологический процесс ПЭПП по схеме с локальной зоной полирования деталей с отношением длины отверстия к диаметру $L > 6d$.

В случае, когда длина детали много больше диаметра полируемого отверстия, рассмотренный выше технологический процесс ПЭПП не может быть применим в силу особенности распределения напряженности электрического поля в МЭЗ при обработке внутренних поверхностей протяженных сквозных отверстий.

Условием обеспечения стабильного процесса ПЭПП является необходимость обеспечить такой уровень напряженности и плотности тока, который будет достаточен для ионизации электролита на всей площади внутренней поверхности отверстия, обрабатываемой детали.

Рассмотрим пример полирования внутреннего диаметра трубки изготовленной из меди марки МЗ. Внутренний диаметр трубки (d) 16 мм, длина (L) 150 мм.

Предлагаемая схема локального ПЭПП (ЛПЭПП) отличается тем, что осуществляется последовательная пошаговая обработка внутренней поверхности по ее длине. Для этого, определенная часть поверхности ЭК

изолируется керамическими втулками, а открытая часть ЭК, образует локальную рабочую зону обработки, которая равна длине не изолированной части электрода (рис. 9).

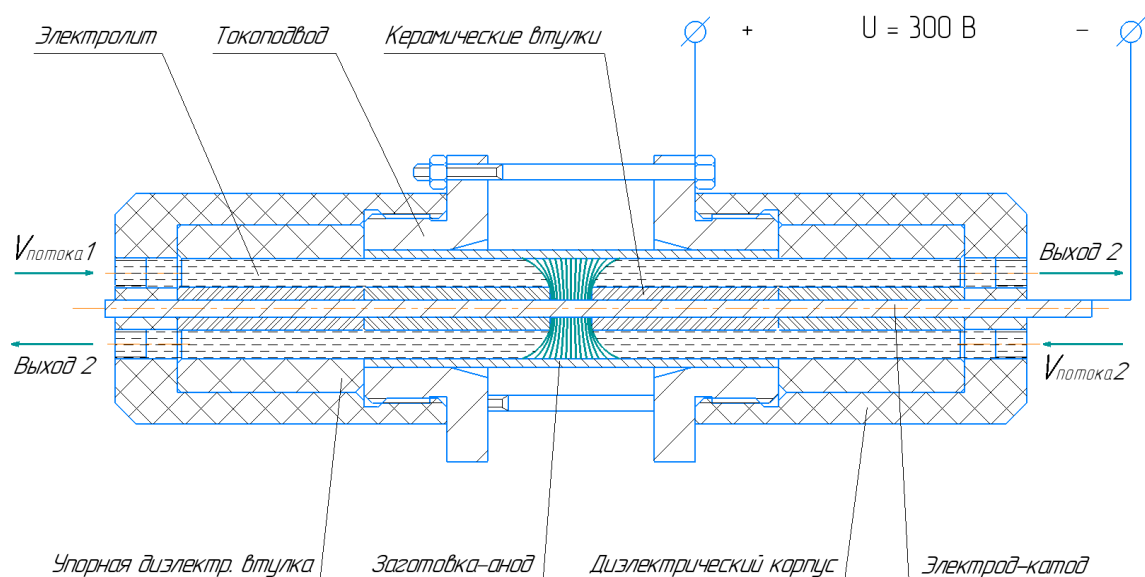


Рис. 9. Схема локального ПЭПП.

Таким образом, обеспечивается постоянство значений уровня напряженности электрического поля на локальном участке (площади) поверхности обрабатываемого отверстия. Вследствие поступательного перемещения изолирующих втулок, с заданным шагом, осуществляется смещение локальной рабочей зоны ЭК по длине отверстия, за счет чего обеспечивается поэтапное полирование внутренних поверхностей отверстия деталей любой протяженности [8-10].

Обработка трубок из меди МЗ с диаметром отверстия 16 мм, длиной 150 мм и начальной $Ra = 0,63$ мкм осуществлялась в три прохода ($N = 3$) при следующих режимах: $U = 300$ В, $T = 70$ °С, $n = 3$ %, $v_{эл} = 0,15$ л/с, $l_{лз}/L_{дет} = 1/3$ (локальная зона 50 мм).

На рис. 10 приведены фотографии процесса по схеме локального ПЭПП в три прохода.

На рис. 11 приведено графическое представление изменения целевого параметра шероховатости (Ra) в зависимости от скорости потока электролита ($v_{эл}$) и длины локальной зоны полирования ($l_{лз}$), оказывающих наибольшее влияние на процесс полирования отверстий по схеме ЛПЭПП. При этом, концентрация и температура электролита соответственно равны $n = 3$ %, $T = 70$ °С.

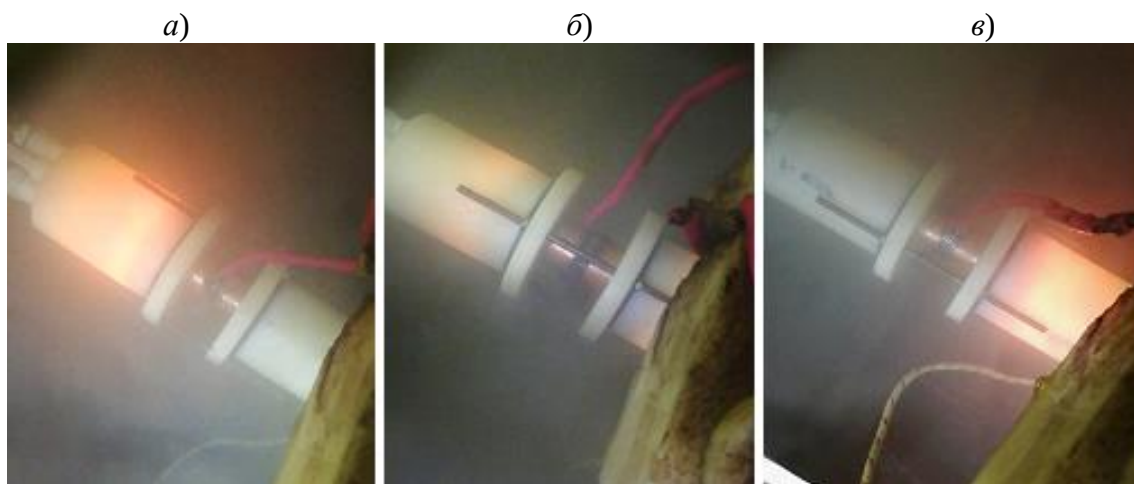


Рис. 10. а) обработка левой части детали, б) центральной части, в) правой части.

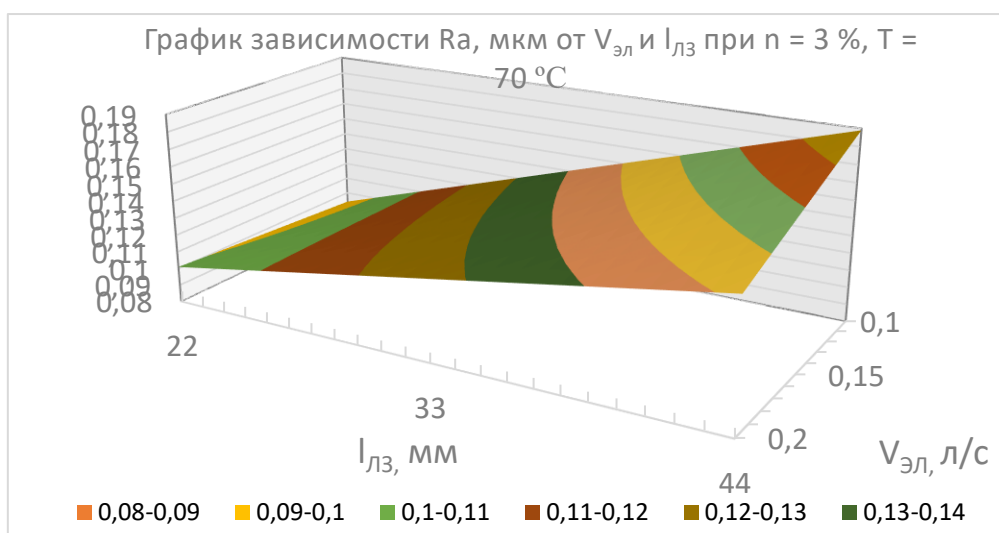


Рис. 11. График зависимости R_a , мкм от $v_{эл}$, л/с и $l_{лз}$, мм при $n = 3 \%$, $T = 70 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

В заданном интервале значений параметров режима технологического процесса ЛПЭПП, обеспечивается стабильность процесса обработки внутренних поверхностей, что позволяет при исходной шероховатости $R_a = 0,32$ мкм снизить данный параметр с 0,19 до 0,09 мкм обработанной поверхности.

Значительного снижения параметра R_a можно достичь в результате уменьшения длины локальной зоны полирования ($l_{лз}$) при расчетной скорости потока электролита ($v_{эл}$), не приводящая к пробое МЭЗ вследствие нарушения пленочного кипения электролита.

Результаты эксперимента по отработке рационального режима ЛПЭПП при полировании трубки-образца с исходной шероховатостью поверхности $R_a = 0,32$ мкм проиллюстрированы изменением состояния внутренней поверхности до и после обработки (рис.12). Обработка осуществлялась за три

прохода по 60 с каждый. Установлено, что снижение параметра шероховатости R_a в интервале 0,06 - 0,09 мкм.



Рис. 12. Шероховатость поверхности: а) до обработки, б) после обработки.

Соответственно, рациональная область применения схемы ЛПЭПП внутренних поверхностей отверстий деталей с отношением длины к диаметру $L > 6d$ ограничивается следующими значениями параметрами режимов технологического процесса: $U = 300$ В, $T = 70$ °С, $n = 3$ %, $v_{эл} = 0,1$ л/с в три прохода (N). Потребляемый ток I , рассчитывается по формуле 2. Состав электролита выбирается с учетом материала обрабатываемой детали, согласно табл.1. Скорость потока электролита ($v_{эл}$) определяется по формуле 5 с поправкой на параметр длины локальной зоны полирования ($l_{лз}$). Длина локальной зоны полирования ($l_{лз}$), выбирается исходя из геометрических параметров поперечного сечения обрабатываемого отверстия протяженной детали [11-15].

Заключение

В результате проведенных экспериментально-теоретических исследований выполнена научно обоснованная критериальная оценка возможной области применимости ЭПП. Установлены границы области основных параметров процесса обработки наружных и внутренних поверхностей деталей при различных технологических схемах ЭПП.

Определены рациональные режимы ЭПП при реализации технологических процессов по схеме погружения обрабатываемой детали в ванну с электролитом, по схеме принудительной подачи электролита в зону полирования и размещением ЭК в обрабатываемом отверстии, а также процесса по схеме принудительного ЭПП с локальной зоной полирования внутренних поверхностей протяженных деталей.

Приведена графическая интерпретация областей реализации обработки деталей по вышеуказанным схемам и влияние основных варьируемых

режимных параметров на изменение целевого параметра Ra для каждой рассмотренной схемы реализации ЭПП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Надеев А.И., Попов А.И., Сурин А.В., Свечников Ю.К. Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.
- [2] Безденежных Т.И., Шапкин В.В., Угольников О.В. [и др./ Институциональные аспекты инновационной экономики: монография / Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный университет сервиса и экономики, 2012. – 131 с. – ISBN 978-5-228-00590-7. – EDN TLVEJZ.
- [3] Куликов И.С., Ващенко С.В., Каменев А.Я. / Электролитно-плазменная обработка материалов / Минск: «Белорусская наука». 2010. - 232 стр. ISBN 978-985-08-1215-5.
- [4] Суминов И.В., Белкин П.Н., Эпельфельд А.В. [и др.]. Плазменно-электролитическое модифицирование поверхности металлов сплавов. Том 2. Монография / – Москва: Техносфера, 2011. – 512 с. – ISBN 978-5-94836-268-7. – EDN RBATRZ
- [5] Кузьмичев И.С., Ушомирская Л.А., Шмельков А.В., Сысоев И.А. Финишная технология обработки сквозных прямоосных, глубоких, цилиндрических отверстий в металлических изделиях принудительным электролитно-плазменным полированием. Научно-производственный журнал «Металлообработка». АО «Издательство "Политехника"». №3 (99)/2017. стр. 21-27. ISSN 1684-6702.
- [6] Попов А.И., Тюхтяев М.И., Радкевич М.М., Новиков В.И. Анализ тепловых явлений при струйной фокусированной электролитно-плазменной обработке, Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 4(254)' 2016, УДК. 621.78, DOI:10.5862/JEST.254.15
- [7] Ushomirskaya L.A., Baron Yu.M., Kuzmichev I.S. Design of Special Device for the Forced Electrolytic-Plasma Polishing of Internal Surfaces by Counter Flows // Key Engineering Materials, ISSN: 16629795, Vol. 822, pp 610-616, <https://doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.822.610>. Надеев А.И., Попов А.И., Сурин А.В., Свечников Ю.К.. Принципы построения автоматизированных систем поддержки жизненного цикла инновационных продуктов / Датчики и системы. – 2006. – № 11. – С. 59-63. – EDN KWMQTP.
- [8] Radkevich M.M., Kuzmichev I.S. Technological Schemes for Elongated Foramen Internal Surface Finishing by Forced Electrolytic-Plasma Polishing

- // *Advances in Mechanical Engineering*. “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg State Polytechnic University, Russia, June 2020 - pp 102-111. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-62062->
- [9] Попов А.И., Новиков В.И., Радкевич М.М.. Особенности формирования электрического разряда между струйным электролитическим катодом и металлическим анодом при атмосферном давлении // *Теплофизика высоких температур*. – 2019. – Т. 57. – № 4. – С. 483-495. – DOI 10.1134/S004036441903013X. – EDN SJQXBG.
- [10] Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M. Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation 250 and inline metrology / *Micromachines*. – 2019. – Vol. 10. – No 3. – P. 214. – DOI 10.3390/mi10030214. – EDN QPFGBN.
- [11] Радкевич М.М., Кузьмичев И.С. Применение локального принудительного электролитно-плазменного полирования для обработки отверстий // *Электрофизические методы обработки в современной промышленности: Материалы IV Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов*. – Пермь, 14-15 декабря 2020 г. — с. 119-124. ISBN 978-5-398-02489-0.
- [12] Кузьмичев И.С. Технологическое обеспечение и повышение качества обработки протяженных отверстий при локальном принудительном электролитно-плазменном полировании: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. - Санкт-Петербург, 2021. – 22 с. Доступ из сети Интернет (чтение). <http://elibrary.spbstu.ru/dl/2/r21-31.pdf>.
- [13] Попов А.И., Радкевич М.М., Медко В.С. [и др.]. Патент № 2656318 С1 Российская Федерация, МПК C23C 14/35. Магнетронная распылительная головка: № 2017111428: заявл. 04.04.2017: опубл. 04.06.2018/ заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого" (ФГАОУ ВО "СПбПУ"). – EDN UQSEXV.
- [14] Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G.. Thinnest Finishing
- [15] Treatment with a Focused Jet of Electrolytic Plasma // *Advances in Mechanical Engineering: Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME)*, Saint-Petersburg, Russia, 01–02 июня 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 139-149. – DOI 10.1007/978-3-030-39500-1_15. – EDN SSNLCQ.
- [16] Zakharov S.V., Korotkikh M. T.. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model / // *Advances in Mechanical Engineering: Part of the*

Michail M. Radkevich¹
Ivan S. Kuzmichev²

ELECTROLYTIC-PLASMA POLISHING

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia;

²ZAO «ANAGAZ», Saint Petersburg, Russia

Abstract

The article discusses the results of mastering the technological processes required for the implementation of electrolytic-plasma polishing on parts made of steel, copper and its alloy. It also describes the basic principles of engineering and research necessary to determine the criteria for applying electrolytic-plasma polishing in mechanical engineering in order to solve specific problems related to improving the surface quality of parts.

Keywords: technology, equipment, device, part, potential, electrolyte, plasma, polishing, roughness, criteria, modes, concentration, temperature, flow, electrode, equidistant, local.

REFERENCES

- [1] Nadeev A.I., Popov A.I., Surin A.V., Svechnikov Yu.K. Principes van het bouwen van geautomatiseerde systemen ter ondersteuning van de levenscyclus van innovatieve producten / sensoren en systemen. – 2006. – nr. 11. – Blz. 59-63. – EDN KWMQTP.
- [2] Bezdenezhnykh T.I., Shapkin V.V., Oegolnikova O.V. [en anderen / Institutionele aspecten van innovatieve economie: monografie / St. Petersburg State University of Service and Economics. - St. Petersburg: St. Petersburg State University of Service and Economics, 2012. - 131 blz. - ISBN 978-5-228-00590-7. - EDN TLVEJZ.
- [3] Kulikov I.S., Vashenko S.V., Kamneva A.Ya. / Elektrolitno-plazmennaya obrabotka materialov / Minsk: “Belorusskaya navuka”. 2010. – 232 s. ISBN 978-985-08-1215-5.
- [4] Suminov I.V., Belkin P.N., Epelfeld A.V. [i dr.]. Plasma-elektrolytische modificatie van het oppervlak van metalen en legeringen. Deel 2. Monografie / – Moskou : Technosfeer, 2011. – 512 blz. – ISBN 978-5-94836-268-7. – EDN RBATRZ. Slovetzky D.I, Terentyev S.D. Parametry elektricheskogo razryada v electrolitakh I fiziko-khimicheskiye protsessy v

- electrolitnoy plasma. Khimiya vysokikh energy. 2003, T. 37, No 5. s. 355–362. (rus.)
- [5] Kuzmichev I.S., Ushomirskaya L.A., Shmelkov A.V., Sysoev I.A. Linear, inner, lengthy surfaces finishing using the forced-flow electrolyte-plasma process for metal products. Nauchno-proizvodstvennii jurnal “Metalloobrabotka”. AO «Izdatel'stvo “Politehnika”». №3 (99)/2017. – 70 str. (rus.) ISSN 1684-6702.
 - [6] Popov A.I., T'ughtyaev M.I., Radkevich M.M., Novikov V.I.. Analiz teplovih yavlenii pri struinoi fokusirovannoi elektrolitno-plazmennoi obrabotke, Nauchno-tehnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta, 4(254)' 2016, UDK. 621.78, DOI:10.5862/JEST.254.15
 - [7] Ludmila A. Ushomirskaya, Yuri M. Baron, Ivan S. Kuzmichev. Design of Special Device for the Forced Electrolytic-Plasma Polishing of Internal Surfaces by Counter Flows // Key Engineering Materials, ISSN: 16629795, Vol.822,pp 610-616, <https://doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.822.610>.
 - [8] Radkevich M.M., Kuzmichev I.S. Technological Schemes for Elongated Foramen Internal Surface Finishing by Forced Electrolytic-Plasma Polishing // Advances in Mechanical Engineering. “Modern Engineering: Science and Education”, Saint Petersburg State Polytechnic University, Russia, June 2020 - pp 102-111.<https://doi.org/10.1007/978-3-030-62062-2>.
 - [9] Popov A.I., Radkevich M.M., Medko V.S. [en anderen]. Octrooi nr. 2656318 C1 Russische Federatie, IPC C23C 14/35. Magneton sputterkop: Nee 2017111428: Toepassing 04.04.2017: uitg. 04.06.2018/ aanvrager Federale Staat Autonome Onderwijsinstelling voor Hoger Onderwijs "Peter de Grote St. Petersburg Polytechnic University" (SPbPU). – EDN UQSEXB.
 - [10] Danilov I., Hackert-Oschätzchen M., Zinecker M. Process understanding of plasma electrolytic polishing through multiphysics simulation 250 and inline metrology / Micromachines. – 2019. – Vol. 10. – No 3. – P. 214. – DOI 10.3390/mi10030214. – EDN QPFGBH.
 - [11] Radkevich M.M., Kuzmichev I.S. Application of local compulsory electrolyte-plasma polishing for hole processing. – Perm, December 14-15 2020 г. — с. 119-124. ISBN 978-5-398-02489-0.
 - [12] Kuzmichev I.S. Quality improvement of elongated foramen surfaces by the local forced electrolytic-plasma polishing technological implementation: Specialty: 05.02.08 “Mechanical engineering technology”: abstract of Ph.D. dissertation; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. – Saint-Petersburg, 2021. – 22 p. Internet access (reading) <http://elib.spbstu.ru/dl/2/r21-31.pdf>.
 - [13] Popov A.I., Radkevich M.M., Medko V.S. [en anderen]. Octrooi nr. 2656318 C1 Russische Federatie, IPC C23C 14/35. Magneton sputterkop: Nee 2017111428: Toepassing 04.04.2017: uitg. 04.06.2018/ aanvrager

- Federale Staat Autonome Onderwijsinstelling voor Hoger Onderwijs "Peter de Grote St. Petersburg Polytechnic University" (SPbPU). – EDN UQSEXB.
- [14] Popov A.I., Radkevich M.M., Teplukhin V.G.. Thinnest Finishing
- [15] Treatment with a Focused Jet of Electrolytic Plasma // Advances in Engineering: Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME), Saint-Petersburg, Russia, 01–02 June, 2019.– Cham: Springer, 2020. – P. 139-149. – DOI 10.1007/978-3-030-39500-1_15. – EDN SSNLCQ.
- [16] Zakharov S.V., Korotkikh M. T.. Electrolyte-Plasma Polishing Ionization Model / // Advances in Mechanical Engineering: Part of the Lecture Notes in Mechanical Engineering book series (LNME), Saint Petersburg, Russia, 01–02 июня 2019 года. – Cham: Springer, 2020. – P. 193-208. – DOI 10.1007/978-3-030-39500-1_20. – EDN FDKQTK.