

В.И.Осипенко<sup>1</sup>, д-р техн.наук, Д.О.Ступак<sup>1</sup>, канд.техн.наук, А.В.Билан<sup>2</sup>

1-Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля, г.Черкассы, Украина;

2-Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина

## ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

*В статті розраховано конфігурацію електростатичного поля в МЭП при електрохімічній обробці тонкими дрітними електродами. Отримано та експериментально підтверджено рівняння, що описують розподіл електричного струму по оброблюваній поверхні. Показано можливість прогнозувати точність формування деталі, а також розраховувати за заданими кресленням деталі необхідні режими обробки, при використанні перспективної гібридної технології.*

*The article is devoted to calculation of electrostatic field configuration in IEG at electrochemical machining by thin wire electrodes. Equalizations, which describe the distributing of electric-field tension and anodal current density on a surface which is processed are got and experimentally verified. Possibility to foresee exactness of detail formation as well as to calculate necessary conditions of machining at the usage of perspective hybrid technology according to the drafted parameters are analysed.*

### Введение.

На современном этапе развития технологий обработки материалов все более широко используются электрохимические методы обработки. Одним из новых и перспективных методов обработки поверхностей электрохимическим способом (рис. 1) является электрохимическая обработка проволочным электродом (ЭХОПЭ) [1, 2].

Перспективы данного метода обусловлены тем, что производства, где используются технологии электроэрозионной проволочной обработки, предъявляют высокие требования к параметрам изделий. Особенно это относится к шероховатости полученных поверхностей и отсутствию в структуре поверхностных слоев зоны термического влияния. Выполнить эти требования, находясь в рамках технологии электроэрозионного разрушения материала сложно, дорого, а по отношению к зоне термического влияния практически невозможно. Электрохимическая обработка принципиально позволяет достаточно эффективно получать поверхности с  $Ra < 0.3$  мкм при полном отсутствии зоны термического влияния. Несмотря на то, что схемы и технологические возможности размерной электрохимической обработки достаточно хорошо изучены [3-6], схема обработки сложнопрофильных линейчатых поверхностей тонким проволочным электродом, при движении электрода эквидистантно к формируемой поверхности осталась практически неизученной.

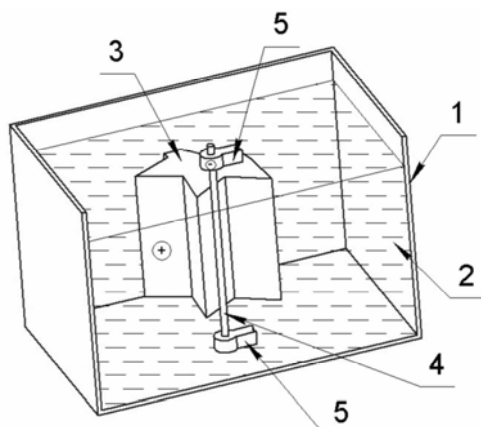


Рис. 1. Схема реализации способа ЭХОПЭ: 1 – рабочая ванна станка; 2 – электролит; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – проволочный электрод; 5 – держатели проволочного электрода

Таким образом, развитие и совершенствование ЭХОПЭ как метода обработки связано с необходимостью комплексного исследования базовых физико-химических процессов, протекающих в межэлектродном промежутке (МЭП). Совокупность технологических параметров обработки (величина МЭП ( $\Delta$ ), состав, температура и гидродинамические особенности течения электролита, амплитудно-временные параметры источника технологического тока, скорость движения электрода) определяют механизмы разрушения материала заготовки и, соответственно, параметры поверхности, полученной при ЭХОПЭ. Одним из наиболее важных и сложных вопросов, связанных с ЭХОПЭ есть распределение плотностей токов в МЭП при использовании относительно тонких проволочных электродов (0,1...0,3 мм). Плотность токов существенно влияет на процессы массопереноса на границе металл-электролит, тем самым во многом определяет показатели качества полученной поверхности. Особенно

остро этот вопрос стоит при обработке сложнопрофильных деталей, где, в отличие от традиционной электрохимической обработки, необходимо технологически обеспечить локализацию процесса обработки и, соответственно, получить контролируемую зону растекания технологического тока, обеспечивающего требуемую

глубину съема и качество полученной поверхности. На практике это обеспечит управляемость процесса обработки и прогнозируемость его результатов.

#### Постановка задачи.

Параметры анодного растворения в зоне обработки при ЭХОПЭ (для выбранного типа и концентрации электролита) можно варьировать изменением расстояния между электродами и подбором диаметра проволочного электрода. Это позволяет получить различное распределение потенциала между электродами и, соответственно, различную конфигурацию напряженности электрического поля на поверхности обрабатываемой детали, определяющую плотность тока и степень локализации процесса. Таким образом, целью данной работы является получение уравнений, описывающих распределение плотности анодного тока по поверхности заготовки, позволяющих получить формальное математическое описание процесса анодного растворения в зоне обработки при ЭХОПЭ.

#### Изложение основного материала исследований.

В общем случае распределение плотности тока между электродами есть функцией удельной электропроводности электролита и напряженности электрического поля [7]:

$$j(x, y, z) = \kappa \cdot \vec{E}(x, y, z), \quad (1)$$

где  $\kappa$  - удельная электропроводность электролита,

$x, y, z$  - координаты в принятой прямоугольной системе координат.

Распределение напряженности электрического поля в межэлектродном промежутке характеризуется выражением:

$$\vec{E}(x, y, z) = -grad\varphi, \quad (2)$$

где  $grad\varphi = \vec{k} \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \vec{l} \frac{\partial\varphi}{\partial y} + \vec{m} \frac{\partial\varphi}{\partial z}$ ,  $\vec{k}$ ,  $\vec{l}$ ,  $\vec{m}$  - единичные векторы в направлении осей  $x, y, z$ .

При обработке плоской поверхности детали проволочным электродом цилиндрической формы задача по определению распределения потенциала в межэлектродном промежутке несколько упрощается.

Рассмотрим случай ЭХОПЭ, при котором катодом есть бесконечный цилиндр (проволока), анодом - плоскость. Первичное распределение потенциала  $\varphi(x, y)$  в МЭП не зависит от высоты и есть функцией расстояний от поверхностей катода и анода, радиуса цилиндрического катода, поверхностной плотности заряда и может быть рассчитана по классическим уравнениям для потенциального электростатического поля [7]. При этом следует учесть, что наилучшие показатели качества обработанной поверхности получают при более высоких токах, а, следовательно, и при более высокой разнице потенциалов между электродами (напряжении внешнего источника питания). Предварительно проведенные эксперименты показали, что для схемы ЭХОПЭ максимальное значение разности потенциалов ограничено значением 6 В, поскольку при больших значениях напряжения начинаются процессы образования в зоне анодного растворения пассивирующих пленок, и, как следствие, снижается

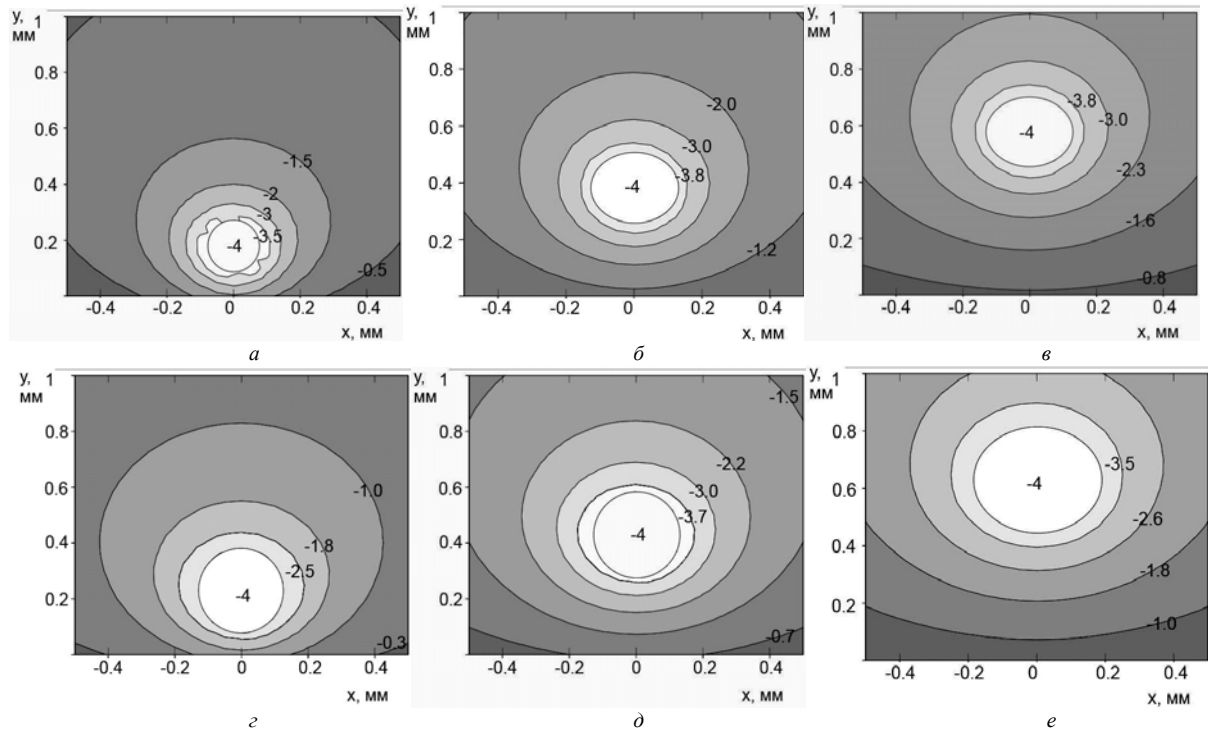


Рис. 2. Изопотенциальные линии в межэлектродном промежутке между цилиндрическим проволочными электродами диаметром 0,15 мм (а, б, в), 0,25 мм (г, д, е) и плоской поверхностью заготовки для величины МЭП: а, г – 0,1 мм; б, д – 0,3 мм; в, е – 0,5 мм (разность потенциалов между электродами – 4В, учтены анодная и катодная поляризации)

производительность обработки и качество поверхности. Наилучшее качество поверхности для среднеуглеродистых сталей удалось получить при разности потенциалов между электродами 4 В, поэтому в дальнейших расчетах будем использовать именно это напряжение.

Съем металла с поверхности заготовки зависит не только от первичного распределения потенциала в МЭП, но и от суммарного электродного потенциала (поляризации электродов). Согласно [8] суммарная величина анодного и катодного потенциалов может быть рассчитана как  $\phi(j) = 0,17 \cdot \ln(1 + j)$ . Данная зависимость была экспериментально проверена гальваностатическим методом [7], адаптированным к схеме ЭХОПЭ. Результаты экспериментов с приемлемой точностью совпадают с результатами расчетов по предложенному уравнению.

Проведенными экспериментальными исследованиями приемлемых условий электролиза при ЭХОПЭ, установлены особенности, позволившие следующие обоснованные допущения о свойствах системы:

- из-за малости поверхностей проволочного катода и анода в зоне обработки емкостью двойного слоя можно пренебречь;
- в области исследуемых режимов электролиза пассивация поверхности электродов отсутствует;
- при требуемой скорости течения электролита в МЭП не образуется прианодный вязкий слой из продуктов реакций и соответственно не изменяется локальная концентрация электролита;
- латеральные потоки зарядов и масс на поверхности анода отсутствуют.

Таким образом, исходя из принятых допущений, в схеме ЭХОПЭ плотность анодного (фарадеевского) тока определяется первичным распределением потенциала в межэлектродном промежутке, с учетом поляризации анода и катода, формирующим параметры напряженности электростатического поля на поверхности анода

Распределение потенциала в межэлектродном промежутке с учетом поляризации электродов рассчитано с помощью пакетов прикладных программ в среде MathCAD (рис. 2).

Как видно из результатов расчетов при уменьшении расстояния между цилиндром и плоскостью увеличивается плотность эквипотенциальных линий в МЭП, а соответственно, должна расти и степень локализации

анодного тока. Изменение диаметра проволочного электрода приводит к изменению распределения поля вокруг него, однако непосредственно в межэлектродном зазоре существенных изменений не наблюдается.

Съем материала с заготовки происходит согласно закону Фарадея вследствие прохождения анодного тока между поверхностью заготовки и катодом. При этом неравномерность плотности анодного тока приводит к неравномерному съему материала с заготовки. На рис. 3 приведена рассчитанная плотность анодного тока по поверхности заготовки.

Для удобства работы, при прогнозировании результатов обработки полученные кривые (рис.3) необходимо описать математическими функциями.

Исходя из вышеизложенного, найдем зависимости распределения анодного тока по поверхности детали от величины межэлектродного промежутка для каждого из используемых электродов отдельно.

Известно [8], что при малых значения плотности токов растворение материала анода не происходит. Как видно из рис.3 ширина зоны, в которой плотность анодного тока превышает  $0,2 \text{ A/cm}^2$  не более 2 мм. В пределах этой зоны полученные кривые можно описать в виде функции нормального распределения вида:

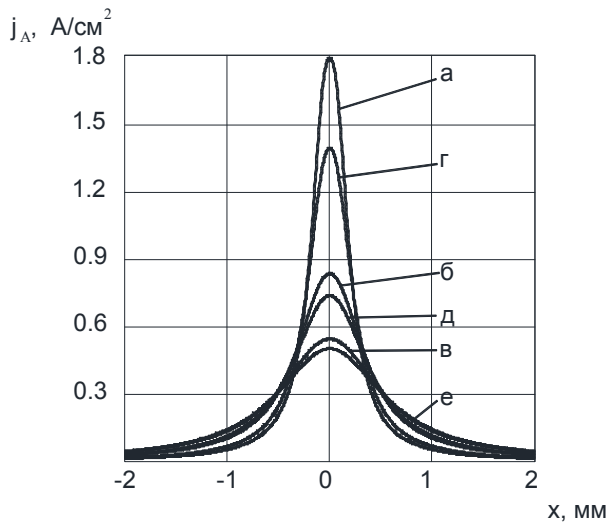


Рис. 3. Распределение плотности анодного тока по поверхности анода при обработке электродами диаметром 0,15 мм (а, б, в) и 0,25 мм (г, д, е) для  $\Delta = 0,1 \text{ мм}$  (а, г),  $\Delta = 0,3 \text{ мм}$  (б, д),  $\Delta = 0,5 \text{ мм}$  (в, е), (6% водный раствор NaCl с удельной электропроводностью  $\kappa = 0,078 \text{ 1/(Ом·см)}$ )

$$j_A(x) = \frac{a}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma}} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot \sigma^2}} + b \left( \frac{A}{\text{см}^2} \right). \quad (3)$$

Параметры полученных нормальных распределений сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Параметры нормальных распределений, описывающих расчетное распределение анодного тока по поверхности заготовки

№ п/п	Диаметр проволоки, мм	МЭП, $\Delta$ , мм	$a$	$\sigma$	$b$
1	0.15	0.1	0.295	0.078	0.23
2	0.15	0.3	0.197	0.13	0.22
3	0.15	0.5	0.139	0.17	0.21
4	0.25	0.1	0.250	0.09	0.25
5	0.25	0.3	0.182	0.14	0.21
6	0.25	0.5	0.120	0.17	0.22

Зависимость коэффициентов  $a$  и  $\sigma$  от величины МЭП носит квадратичный характер. Коэффициенты  $a$  и  $b$  прямопропорциональны удельной электропроводности электролита  $\kappa$ . После математической обработки полученных данных можно записать следующие формулы для определения плотности анодного тока на поверхности заготовки от величины межэлектродного промежутка:

$$j_A(x)_{0.15} = \frac{\kappa \cdot (4.13 - 7.99 \cdot \Delta + 5.84 \cdot \Delta^2)}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (0.035 + 0.47 \cdot \Delta - 0.4 \cdot \Delta^2)}} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot (0.035 + 0.47 \cdot \Delta - 0.4 \cdot \Delta^2)^2}} + \kappa \cdot (2.67 - 0.5 \cdot \Delta), \quad (4)$$

$$j_A(x)_{0.25} = \frac{\kappa \cdot (3.29 - 4.25 \cdot \Delta + 0.88 \cdot \Delta^2)}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot (0.057 + 0.35 \cdot \Delta - 0.25 \cdot \Delta^2)}} e^{-\frac{x^2}{2 \cdot (0.057 + 0.35 \cdot \Delta - 0.25 \cdot \Delta^2)^2}} + \kappa \cdot (3.31 - 5.15 \cdot \Delta + 7.13 \cdot \Delta^2) \quad (5)$$

Полученные уравнение позволяет рассчитать, при известных постоянных значениях характеристик электролита, распределение плотности анодного тока вдоль поверхности обрабатываемой детали для проволочных электродов диаметром 0.15 и 0.25 мм, а соответственно и объем удаленного материала согласно закону Фарадея.

В качестве числового параметра, характеризующего степень локализации процесса ЭХОПЭ удобно взять масштабный коэффициент функции нормального распределения  $\sigma$ . Как видно из табл.1, чем меньше величина межэлектродного расстояния  $\Delta$ , тем меньше значение  $\sigma$ , меньше зона растекания тока по поверхности анода и выше локализация процесса. Большее значение величины МЭП, соответствует большим значениям  $\sigma$ , зона растекания анодного тока больше и менее локализованным есть процесс анодного растворения.

Для экспериментального подтверждения сделанных допущений и полученных расчетов было проведено серию экспериментов. Прямоугольная заготовка толщиной 10 мм (сталь 45, ГОСТ 1050-88) фиксировалась и юстировалась в ванне электроэрозионного вырезного станка. Следящая система станка (СЕЛД-02М) и технологические условия эксперимента обеспечивали точность определения взаимного положения проволоки и плоскости обработки (геометрическая величина МЭП) на уровне  $\pm 0,01$  мм. Исследования проводились для диаметров проволоки 0,15; 0,2; 0,25 мм на геометрических величинах МЭП 0,5, 0,3, 0,2, 0,1, 0,05 мм. Остальные основные параметры процесса были фиксированными (разность потенциалов в между электродами  $\Delta\varphi = 4$  В, частота импульсов  $f = 1$  кГц, длительность импульсов тока  $t = 300$  мкс, электролит – 6% водный раствор NaCl, температура электролита  $T = 30^\circ\text{C}$ , давление в сопле промывки  $P = 0.2$  МПа, время процесса на каждой позиции  $\tau = 300$  с. Неподвижный электрод, при подаче на него напряжения, создает в электролите во время импульса электрическое поле, конфигурация которого зависит от величины межэлектродного промежутка и диаметра проволоки. Распределение потенциала в МЭП определяет конфигурацию напряженности электрического поля на поверхности анода, соответствующую ей плотность фарадеевского тока и, как следствие, скорость удаления материала в определенном месте заготовки. На поверхности детали образуются канавки (рис. 4) профиль которых коррелирует с распределением токов в межэлектродном промежутке.

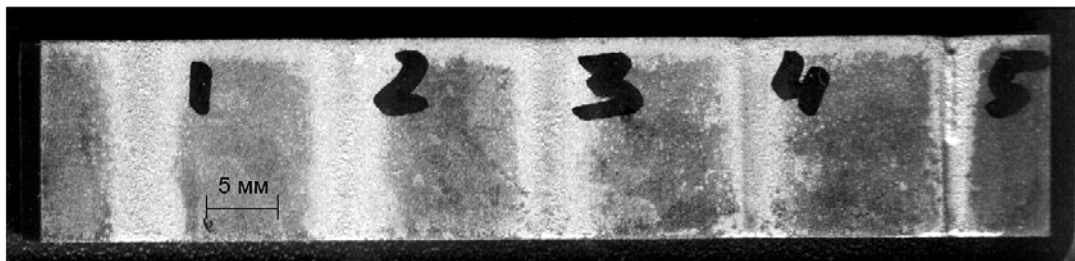


Рис. 4. Фотография образца обработанной пластины при использовании проволоки диаметром 0.15 мм: 1 –  $\Delta=0.5$  мм; 2 –  $\Delta=0.3$  мм; 3 –  $\Delta=0.2$  мм; 4 –  $\Delta=0.1$  мм; 5 –  $\Delta=0.05$  мм

Определение профиля поверхности проводилось на ЧНПП «Микротех» (г. Харьков) с помощью профилометра модели ПМ-210. Образцы полученных профилограмм приведены на рис.5.

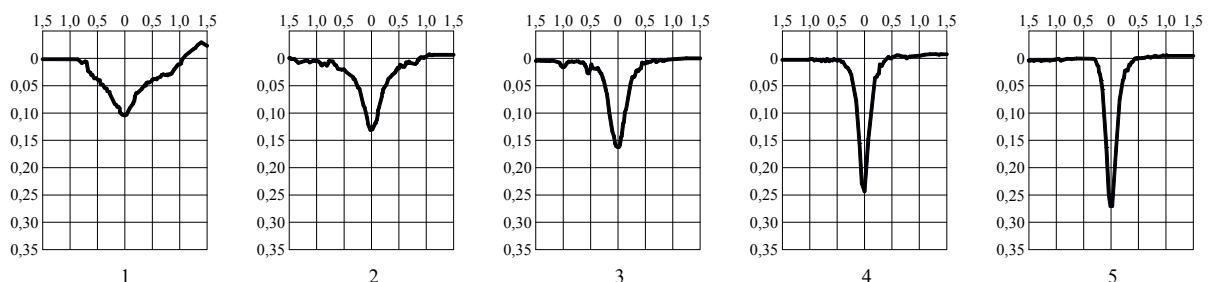


Рис. 5. Профилограммы образца обработанной пластины при использовании проволоки диаметром 0,15 мм: 1 –  $\Delta=0.5$  мм; 2 –  $\Delta=0.3$  мм; 3 –  $\Delta=0.2$  мм; 4 –  $\Delta=0.1$  мм; 5 –  $\Delta=0.05$  мм

Приведенные профилограммы не оставляют сомнений в том, что профиль поверхности непосредственно напротив проволочного электрода существенно изменяется при изменении величины межэлектродного промежутка. Используем результаты эксперимента для оценки достоверности полученных уравнений.

Масса металла, практически снимаемая с единицы поверхности анода, может быть рассчитана по формуле [7]:

$$m = \varepsilon_m \cdot \eta \cdot \int_0^{\tau} j_A(x) d\tau, \quad (6)$$

где  $\varepsilon_m$  – электрохимический весовой эквивалент металла,  $\varepsilon_m = 0.0174$  г/(А·мин);

$\eta$  – коэффициент выхода по току;

$\tau$  – время обработки.

Коэффициент выхода по току определяется экспериментально как соотношение между теоретическим съемом материала и практически обнаруженным.

Рассмотрим образец, полученный при обработке проволокой диаметром 0.15 мм при величине МЭП  $\Delta = 0.3$  мм. Исходя из профилограммы, можно рассчитать площадь удаленного материала и, соответственно, его объем и массу.

$$m_{\text{практ}} = S_{\text{проф}} \cdot h_{\text{заг}} \cdot \rho_{\text{ст}} = 0.071 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 7.8 = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ г.}$$

Подставив в уравнение 6 значение среднего тока получим теоретически возможную массу удаленного материала:

$$m_{\text{теор}} = \varepsilon_m \cdot I_{\text{ср}} \cdot t = 0.0174 \cdot 0.106 \cdot 5 = 9.22 \cdot 10^{-3} \text{ г.}$$

Следовательно, коэффициент выхода по току в условиях эксперимента  $\eta = 0.61$ .

Глубину съема металла с поверхности детали в произвольной точке обработки за один импульс продолжительностью  $t$  секунд находим по формулам:

$$m_x = \varepsilon_m j_A(x) t \eta; \quad h_x = \frac{m_x}{\rho \cdot h_{\text{заг}}} \cdot k_{\text{имп}}.$$

Для нахождения высоты профиля необходимо в формулу 6 подставить значения анодного тока, рассчитанные по формулам 4 или 5. Получив массу удаленного материала за 1 импульс, умножим на количество импульсов за 5 минут обработки и разделим на плотность стали и высоту заготовки. Получим:

$$m_{\text{теор1}} = 0.0174 \cdot \left[ \frac{0.087 \cdot (4.13 - 7.99 \cdot 0.3 + 5.84 \cdot 0.3^2)}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot (0.035 + 0.47 \cdot 0.3 - 0.4 \cdot 0.3^2)} e^{-\frac{0^2}{2 \cdot (0.035 + 0.47 \cdot 0.3 - 0.4 \cdot 0.3^2)^2}} + 0.087 \cdot (2.67 - 0.5 \cdot 0.3) \right] \times \\ \times 3 \cdot 10^{-4} \cdot 0.61 = 3.2 \cdot 10^{-8} \frac{\text{г}}{\text{см}},$$

$$h_{x0} = 3.2 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{300 \cdot 1000}{7.8 \cdot 10} = 0.123 \text{ мм.}$$

В качестве примера на рис.6 представлены результаты сравнения профиля канавки измеренного на профилометре и рассчитанного по полученным уравнениям для проволоки-электрода диаметром 0.15 мм при значении МЭП 0.3 мм.

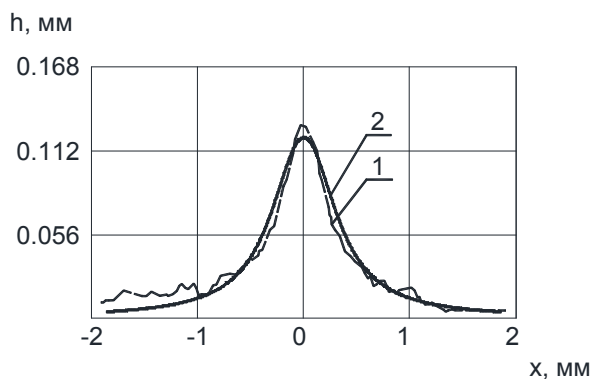


Рис. 6. Экспериментальный (1) и рассчитанный (2) профиль канавки (проволока диаметром 0.15 мм, МЭП – 0.3 мм,  $\Delta\phi$  – 4 В)

Аналогичные расчеты для всех экспериментальных данных показали, что масса удаленного материала отличается от расчетной не более чем на 6%, а глубина съема – не более чем на 7%, что является достаточно хорошим результатом, учитывая неравномерность анодного растворения металла по высоте обрабатываемой заготовки.

Исходя из корреляции экспериментально полученной профилограммы и теоретически рассчитанной, можно утверждать, что возможно спрогнозировать профиль поверхности, полученной при электрохимической обработке проволочным электродом. При этом численные значения расчетного съема материала заготовки зависят от параметров электролита (проводимости), разности потенциалов между электродами, диаметра проволочного электрода, величины межэлектродного промежутка. Таким

образом, по известным технологическим параметрам процесса (в том числе скорости движения проволочного электрода вдоль обрабатываемой поверхности), возможно, рассчитать объем материала, удаленного с поверхности заготовки и соответствующее изменение геометрических размеров, или решить обратную задачу, т.е. по необходимым геометрическим размерам и объему снятого материала рассчитать адекватные параметры технологического процесса.

#### **Выводы.**

1. Установлено, что степень локализации процесса при ЭХОПЭ при известных постоянных значениях характеристик электролита в основном зависит от расстояния между проволочным катодом и анодом-заготовкой. Изменение диаметра проволоки от 0.1 до 0.3 мм (основной диапазон диаметров проволоки, которая используется при электроэрозионной обработке) существенно не влияет на параметры локализации.

2. Рассчитаны параметры распределения потенциалов в межэлектродном промежутке между проволочным электродом-катодом и плоской заготовкой-анодом.

3. Получены уравнения, описывающие характер изменения плотности анодного тока по поверхности обрабатываемой детали. Их практическое применение позволяет прогнозировать, при известных значениях характеристик электролита, диаметре проволочного электрода и межэлектродном расстоянии реальный объем удаленного с заготовки материала.

4. Доказано, что профиль канавок, полученных неподвижным проволочным электродом, хорошо коррелирует с полученными уравнениями распределения плотностей анодного тока по поверхности обрабатываемой заготовки.

5. Созданы элементы системы расчета параметров нового перспективного метода электрохимической обработки поверхностей проволочным электродом.

#### **Список литературы.**

1. Білан А.В., Осипенко В.І., Ступак Д.О. Експериментальне та теоретичне дослідження ефективності згладжування мікронерівностей за умов електрохімічного полірування дротиним електродом // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. Вип. 36. – 10-15 С.

2. Осипенко В.І., Тригуб О.А., Білан А.В., Ступак Д.О. Патент на корисну модель №42823 UA МПК C25F3/00. Спосіб електрохімічного полірування деталей. Заявл. 06.02.2009; Опубл. 27.07.2009; Бюл. №14.

3. Житников В.П., Зиннатуллина О.Р. Моделирование нестационарных процес сов электрохимического формообразования точечным электродом-инструментом // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – Уфа: УГАТУ, - 2007. – №4. - С.95-103.

4. Килимник А.Б. Электрохимические процессы на постоянном и переменном токе // Вестник ТГТУ. – Таганрог: ТГТУ, - 2008. – Т.14. – С.903-916.

5. Клочков Ю.П., Котляр Л.М., Миназетдинов Н.М., Хайруллин А.Х. Электрохимическая обработка металлов электродом с криволинейным участком границы // Фундаментальные исследования. – М.: РАЕ. – 2007. - №12. – С.139-140.

6. Котляр Л.М., Хайруллин А.Х. Об одной задаче стационарной электрохимической обработке металла // Фундаментальные исследования. – М.: РАЕ. – 2008. - №10. – С.60-61.

7. Щербак М.В., Толстая М.А., Анисимов А.П., Пустоногов В.Х. Основы теории и практики электрохимической обработки металлов и сплавов. М.: Машиностроение, 1981. – 263 с.

8. Идрисов Т.Р., Зайцев А.Н., Житников В.П. Повышение локализации процесса анодного растворения в условиях нестационарности электродных потенциалов // Вестник УГАТУ. Машиностроение. – Уфа: УГАТУ, - 2007. – С.122-132.

9. Тамм И.Е. Основы теории электричества: Учеб. пособие для вузов. – М:ФИЗМАТЛИТ, - 2003. – 616 с.