

# РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ТОКА ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ ПРОВОЛОЧНЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

В.И. Осипенко\*, Д.О. Ступак\*, О.А. Тригуб\*\*, А.В. Билан\*\*

\* Академия пожарной безопасности им. Героев Чернобыля,  
ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, 18034, Украина, [denis0810@ukr.net](mailto:denis0810@ukr.net)

\*\* Черкасский государственный технологический университет,  
бул. Шевченко, 460, 18006, г. Черкассы, Украина

Представлены результаты расчета конфигурации электростатического поля в МЭП при электрохимической обработке тонкими проволочными электродами. Результаты расчета подтверждены экспериментально. Показана возможность прогнозировать точность формообразования детали, а также рассчитывать по чертежам детали необходимые режимы обработки при использовании перспективной гибридной технологии.

УДК 620.197

## ВВЕДЕНИЕ

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

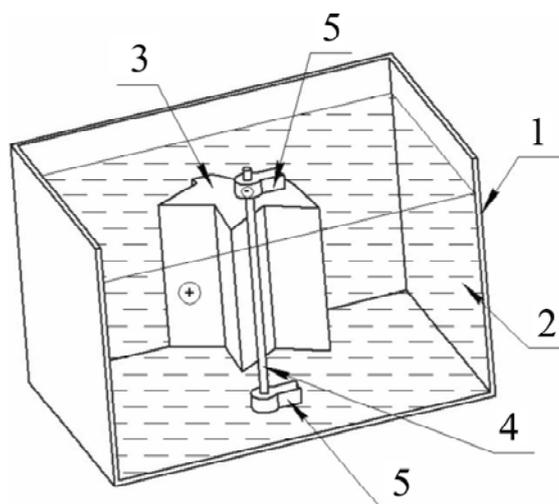


Рис. 1. Схема реализации способа ЭХОПЭ: 1 – рабочая ванна станка; 2 – электролит; 3 – обрабатываемая заготовка; 4 – проволочный электрод; 5 – держатели проволочного электрода

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.

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) определяет механизмы разрушения материала заготовки и соответственно параметры поверхности при ЭХОПЭ. Один из наиболее важных и сложных вопросов, связанных с ЭХОПЭ, – 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 в случае сложнопрофильных деталей, где, в отличие от традиционной электрохимической обработки, необходимо технологически достичь локализации процесса обработки и соответственно получить контролируемую зону растекания технологического тока, обеспечивающего требуемую глубину съема и качество поверхности. На практике это позволяет управлять процессом обработки и прогнозировать его результаты.

## 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 выведение уравнений, описывающих распределение плотности анодного тока по поверхности заготовки, позволяющих получить формальное математическое описание процесса анодного растворения в зоне обработки при ЭХОПЭ.

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

В общем случае распределение плотности тока между электродами является 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  $grad\varphi = \bar{k} \frac{\partial\varphi}{\partial x} + \bar{l} \frac{\partial\varphi}{\partial y} + \bar{m} \frac{\partial\varphi}{\partial z}$ ,  $\bar{k}, \bar{l}, \bar{m}$  – 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 катод – бесконечный цилиндр (проволока), анод – плоскость. Первичное распределение потенциала  $\varphi(x, y)$  в МЭП не зависит от высоты и является 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 наблюдаются при более высоких токах, а следовательно, и при более высокой разнице потенциалов между электродами (напряжении внешнего источника питания). Согласно предварительно проведенным экспериментам для схемы ЭХОПЭ в использованном электролите (6% раствор NaCl) 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, снижаются производительность обработки и качество поверхности. Наилучшее качество поверхности при обработке латунным проволочным электродом (Л63) деталей из среднеуг-

леродистых сталей (стали 30, 45, 55) 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] суммарную величину анодного и катодного потенциалов можно рассчитать, как  $\varphi(j) = 0,17 \cdot \ln(1 + j)$ . Данная зависимость была экспериментально проверена гальваноимпульсным методом [7], адаптированным к схеме ЭХОПЭ. Результаты экспериментов с достаточной точностью совпадают с результатами расчетов по предложенному уравнению.

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

- емкость двойного слоя существенно не влияет на поляризацию электродов;
- 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).

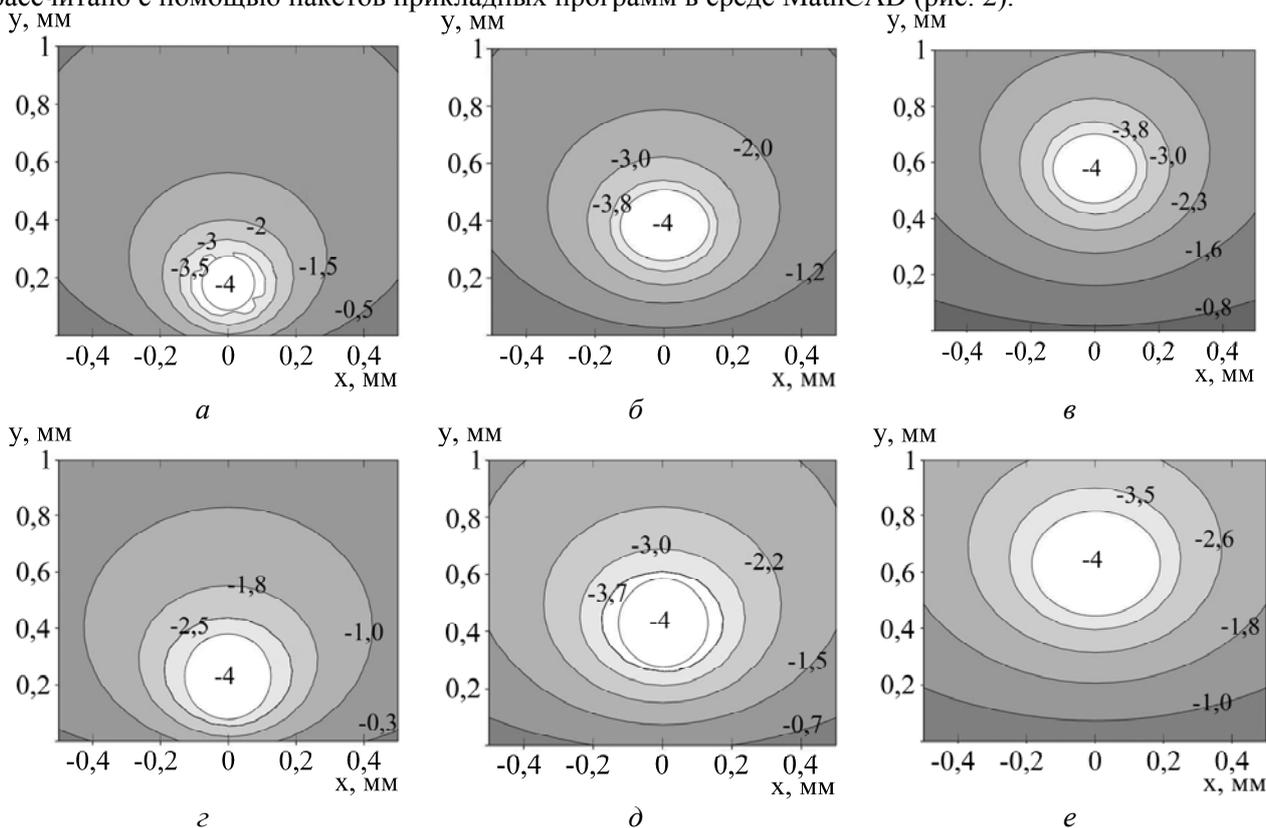


Рис. 2. Изопотенциальные линии в межэлектродном промежутке между цилиндрическими проволочными электродами диаметром 0,15 мм (а, б, в), 0,25 мм (г, д, е) и плоской поверхности заготовки для величины МЭП, мм: а, г – 0,1; б, д – 0,3; в, е – 0,5 (разность потенциалов между электродами – 4 В, учтены анодная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

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 изменений градиента поля 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.

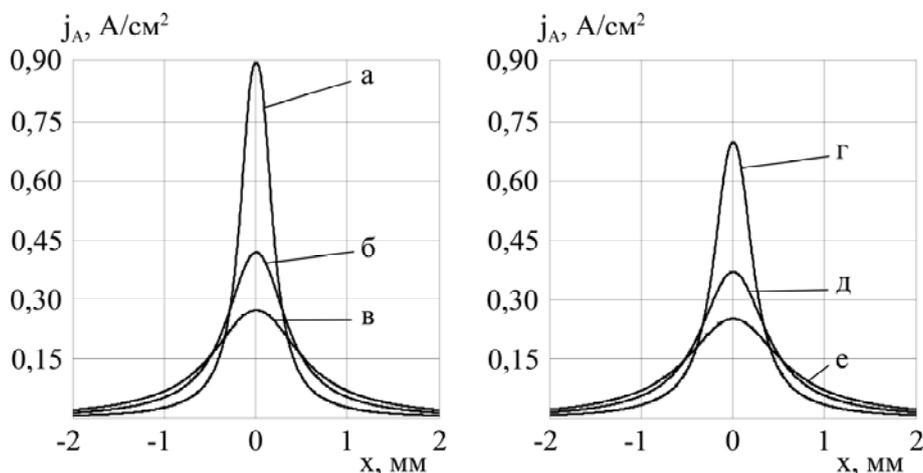


Рис. 3. Распределение плотности анодного тока по поверхности анода при обработке электродами диаметром 0,15 (а, б, в) и 0,25 мм (г, д, е) для  $\Delta = 0,1$  мм (а, г),  $\Delta = 0,3$  мм (б, д),  $\Delta = 0,5$  мм (в, е) (6% водный раствор NaCl с удельной электропроводностью  $\kappa = 0,087$  л/(Ом·см))

Учитывая реальные технологические скорости движения проволочного электрода эквидистантно к обрабатываемой поверхности (2–10 мм/мин) и результаты предварительных исследований [8], можно допустить, что плотности тока менее  $0,2$  А/см<sup>2</sup> практически не влияют на процесс формообразования в зоне обработки. Как видно из рис. 3, ширина зоны, в которой плотность анодного тока превышает  $0,2$  А/см<sup>2</sup>, не более 2 мм. В пределах этой зоны полученные кривые можно описать в виде функции нормального распределения:

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

Параметры полученных нормальных распределений сведены в таблице.

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	0,145	0,078	0,23
2	0,15	0,3	0,098	0,13	0,22
3	0,15	0,5	0,069	0,17	0,21
4	0,25	0,1	0,125	0,09	0,25
5	0,25	0,3	0,091	0,14	0,21
6	0,25	0,5	0,060	0,17	0,22

Зависимость коэффициентов  $a$  и  $\sigma$  от величины МЭП носит квадратичный характер. Коэффициенты  $a$  и  $b$  прямо пропорциональны удельной электропроводности электролита  $\kappa$ . После математической обработки были получены численные зависимости для плотности анодного тока на поверхности заготовки от величины межэлектродного промежутка.

Полученные уравнения позволяют рассчитать, при известных постоянных значениях характеристик электролита, распределение плотности анодного тока вдоль поверхности обрабатываемой де-

тали для проволочных электродов диаметром 0,15 и 0,25 мм и соответственно 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 таблицы, 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 степень локализации процесса анодного растворения ниже.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для экспериментального подтверждения сделанных допущений и полученных расчетов была проведена серия 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 между электродами  $\Delta\phi = 4$  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).

Эксперименты показали, что в условиях рассматриваемой электрохимической ячейки, при использовании импульсного режима обработки время переходных процессов составляет менее 1% длительности импульса, а следовательно, возможно рассматривать каждый отдельный импульс как обработку постоянным током, а сьем материала – согласно принципу суперпозиций (рис. 4).

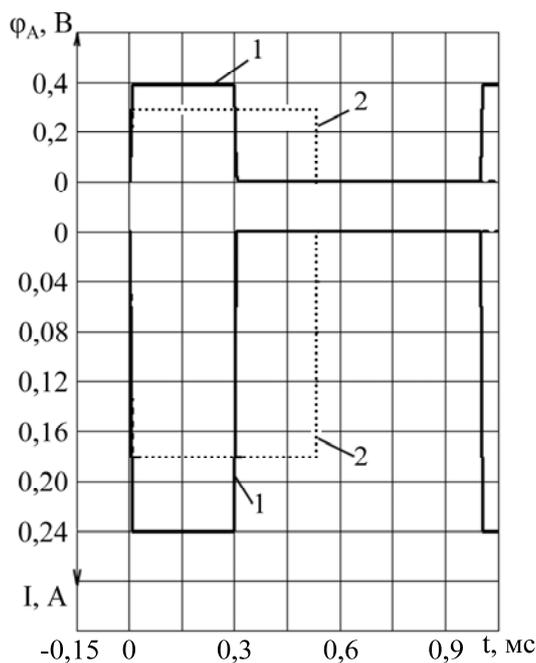


Рис. 4. Осциллограммы поляризации анода токами прямоугольной формы (катод – проволочный электрод ДКРПМ ФКТЛ-63,  $\varnothing 0,15$  мм). Величина межэлектродного промежутка, мм: 1 – 0,3, 2 – 0,5; длительность импульсов тока, мс: 1 – 300, 2 – 500

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. 5), профиль которых коррелирует с распределением токов в межэлектродном промежутке.



Рис. 5. Фотография образца обработанной пластины при использовании проволоки диаметром 0,15 мм.  $\Delta$ , мм: 1 – 0,5; 2 – 0,3; 3 – 0,2; 4 – 0,1; 5 – 0,05

## РЕЗУЛЬТАТЫ

Определение профиля поверхности проводилось на ЧНПП «Микротех» (г. Харьков, Украина) с помощью профилометра модели ПМ-210. Образцы полученных профилограмм приведены на рис. 6.

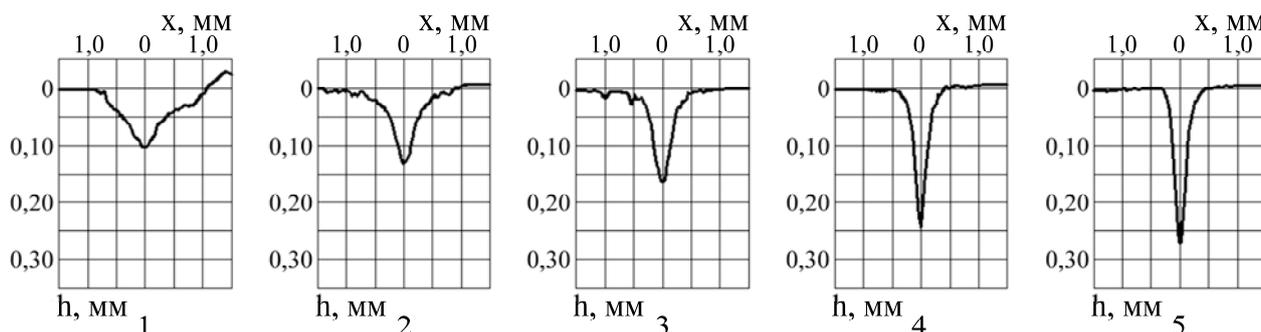


Рис. 6. Профилограммы образца обработанной пластины при использовании проволоки диаметром 0,15 мм.  $\Delta$ , мм: 1 – 0,5; 2 – 0,3; 3 – 0,2; 4 – 0,1; 5 – 0,05

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]:

$$m = \varepsilon_m \cdot \eta \cdot \int_0^{\tau} j_A(x) dt, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_m$  – электрохимический весовой эквивалент металла, равный 0,0174 г/(А·мин) (для ионизации железа в виде двухвалентного);  $\eta$  – 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 (4) значение среднего тока и приняв коэффициент выхода по току равным единице, получим теоретически возможную массу удаленного материала:

$$m_{\text{теор}} = \varepsilon_m \cdot \eta \cdot I_{\text{ср}} \cdot t = 0,0174 \cdot 1 \cdot 0,08 \cdot 5 = 6,96 \cdot 10^{-3} \text{ г.}$$

Следовательно, коэффициент выхода по току в условиях эксперимента  $\eta = 0,81$ . Возможной причиной снижения выхода по току является частичный переход железа в раствор в виде трехвалентного.

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

$$m_x = \varepsilon_m \cdot j_A(x) \cdot t \cdot \eta, \text{ г/мм}, \quad (5)$$

$$h_x = m_x \cdot \frac{k_{имп}}{\rho \cdot h_{заг}}, \text{ мм}, \quad (6)$$

где  $m_x$  – удельная масса материала, снятая с поверхности детали в произвольной точке;  $j_A(x)$  – плотность анодного тока в той же точке;  $h_{заг}$  – глубина съема металла с поверхности детали в произвольной точке;  $k_{имп}$  – количество импульсов тока на протяжении всей обработки;  $h_{заг}$  – высота заготовки;  $\rho$  – плотность материала анода.

В качестве примера на рис. 7 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.

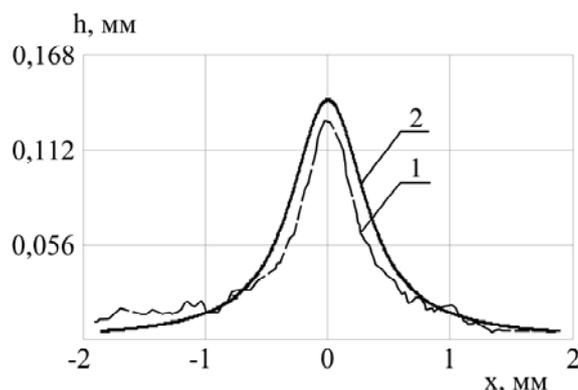


Рис. 7. Экспериментальный (1) и рассчитанный (2) профиль канавки (проволока диаметром 0,15 мм, МЭП – 0,3 мм,  $\Delta\varphi = 4$  В)

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 можно признать вполне удовлетворительным.

Исходя из корреляции, экспериментально полученной профилограммы и теоретически рассчитанной, можно утверждать, что возможно прогнозировать 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, то есть по необходимым геометрическим размерам и объему снятого материала рассчитать адекватные параметры технологического процесса.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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. Показана возможность прогнозирования (при известных значениях характеристик электролита, диаметре проволочного электрода и межэлектродном расстоянии) реального объема 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.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Білан А.В., Осипенко В.І., Ступак Д.О. Експериментальне та теоретичне дослідження ефективності згладжування мікронерівностей за умов електрохімічного полірування дроттяним електродом. *Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць*. Донецьк: ДонНТУ, 2008, (36), 10–15.
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 процессов электрохимического формообразования точечным электродом-инструментом. *Вестник УГАТУ. Машиностроение*. 2007, (4), 95–103.
4. Килимник А.Б. Электрохимические процессы на постоянном и переменном токе. *Вестник ТГТУ*. 2008, **14**, 903–916.
5. Ключков Ю.П., Котляр Л.М., Миназетдинов Н.М., Хайруллин А.Х. Электрохимическая обработка металлов электродом с криволинейным участком границы. *Фундаментальные исследования*. 2007, (12), 139–140.
6. Котляр Л.М., Хайруллин А.Х. Об одной задаче стационарной электрохимической обработке металла. *Фундаментальные исследования*. 2008, (10), 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*. 2007, **9**(1), 122–132.

Поступила 27.09.10

После доработки 25.12.11

### Summary

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.

---