

## ТЕХНОЛОГІЯ РОЗМІРНОГО ЗНІМАННЯ МЕТАЛУ ПРИ ЕЛЕКТРОЛІТНО-ПЛАЗМОВІЙ ОБРОБЦІ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ

*Представлено розроблену технологію електролітно-плазмової обробки циліндричних поверхонь, яка за своїм якісним представленням є безпечною та більш продуктивною технологією порівняно з альтернативними видами (електрохімічна, механічна обробка). Розроблено модель розмірного знімання матеріалу для кількісної оцінки розмірного знімання в процесі електролітно-плазмової обробки. Встановлено зв'язок інтенсивності розмірної електролітно-плазмової обробки з технологічними параметрами процесу та геометрією оброблюваної деталі обертання.*

**Ключові слова:** електролітно-плазмова обробка, оброблювана деталь-анод, електроліт, анодне розчинення металу, міжелектродний простір, щільність струму, радіус кривизни поверхні.

Електролітно-плазмова обробка (ЕПО) широко застосовується для очищення поверхні, зниження шорсткості та зняття задирок на виробах, виготовлених з різних металевих матеріалів. ЕПО є безпечною та більш продуктивною технологією порівнянн з альтернативними видами (електрохімічна, механічна обробка).

Сутність процесу полягає в наступному. Навколо поверхні оброблюваної деталі-анода, зануреної в електроліт, відбувається локальне плівкове скипання електроліту та утворення стабільної парогазової оболонки (ПГО). Сформована в такий спосіб оболонка з пари та газу відтискає електроліт від поверхні деталі та значно збільшує електричний опір у ланцюзі деталь – електроліт. При цьому сила струму різко зменшується, і напруга джерела живлення майже повністю прикладається до парогазової оболонки, що утворилася. Таким чином, через високу локальну напруженість електричного поля виникає часткова іонізація газу із протіканням електричного струму через парогазову оболонку у вигляді імпульсних і дифузійних електричних розрядів [1].

Експериментальні дослідження показали, що при збільшенні тривалості ЕПО можливе застосування технології для точної розмірної обробки деталей обертання. Розмірна ЕПО не вимагає створення складних схем обробки та здійснюється у звичайній ванні-катоді без використання електродів – інструментів спеціальної форми. При цьому на відміну від розмірної електрохімічної обробки не потрібно здійснювати прокачування електроліту через міжелектродний простір.

Продуктивність розмірного знімання при ЕПО можна охарактеризувати швидкістю анодного розчинення металу, що виражається в лінійних (мм/хв) або в об'ємних (мм<sup>3</sup>/хв) одиницях. При обробці деталей обертання доцільно використовувати об'ємні одиниці.

### Розробка моделі розмірного знімання матеріалу

Для кількісної оцінки розмірного знімання в процесі ЕПО встановимо зв'язок інтенсивності розмірної ЕПО з технологічними параметрами процесу та геометрією оброблюваної деталі обертання. Як деталь обертання розглянемо циліндр.

Згідно із законом Фарадея маса (або обсяг) речовини  $\Delta V$ , розчиненого на електроді, прямо пропорційна електричному заряду, що пройшов через електроліт. Стосовно до процесів електрохімічної обробки, у тому числі та для ЕПО, закон Фарадея можна представити в наступному виді [2]:

$$\Delta V = k_v \eta_a I t, \quad (1)$$

де  $k_v$  – об'ємний електрохімічний еквівалент речовини, см<sup>3</sup>/(АЕ·хв);

$\eta_a$  – коефіцієнт виходу по струму (для процесів ЕПО становить 0,215);

$I$  – сила струму, що проходить через електроліт, А;

$t$  – тривалість обробки, хв.

Із закону випливає, що з підвищенням сили струму, що проходить через оброблювану поверхню за однаковий проміжок часу, розмірне знімання металу збільшується. Відповідно, чим вища щільність струму, тим інтенсивніше йде процес обробки. Тому щільність струму є величиною, що визначає інтенсивність розмірного знімання металу в процесі ЕПО.

Щільність струму у свою чергу визначається технологічними параметрами процесу ЕПО (напруга, температура електроліту, глибина занурення, концентрація електроліту), а також формою оброблюваної поверхні. Помічено, що обробка на виступаючих частинах заготовок, таких як гострі крайки, задирки, закрутлення,

іде значно інтенсивніше, чим на плоских, та тим більше ввігнутих ділянках. Причому швидкість знімання металу залежить від радіуса кривизни: чим менший радіус кривизни, тим інтенсивніше знімання. Це явище ускладнює розрахунки процесів формоутворення циліндричних поверхонь методом розмірної ЕПО, оскільки при такій обробці відбувається поступове зменшення радіуса циліндра та зміна швидкості знімання.

Визначимо залежність, що характеризує вплив кривизни оброблюваної циліндричної поверхні на щільність струму. Для цього розглянемо анод, на якому наявні прямо- і криволінійні ділянки (рис. 1). Товщина ПГО на прямолінійній ділянці  $l_0$ , на криволінійному  $l_1$ .

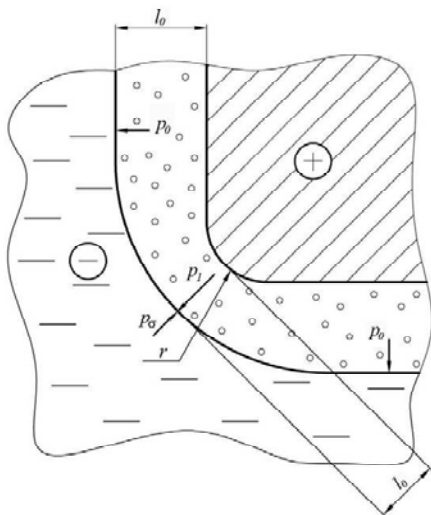


Рис. 1. Розрахункова схема

Будемо вважати, що гідростатичний тиск, що діє на парогозову оболонку навколо всіх ділянок анода, однаковий. Систему анод – ПГО – електроліт будемо розглядати як плоский конденсатор. На плоскій ділянці зовнішній гідростатичний тиск компенсується тиском  $p_0$ , створюваним силою впливу поверхні анода з поверхні електроліту, який визначається за формулою [3]

$$p_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2l_0^2}, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – відносна діелектрична проникність ПГО;

$\varepsilon_0$  – електрична постійна;

$U$  – напруга, прикладена до анода.

На криволінійній ділянці гідростатичний тиск компенсується тиском  $p_1$

$$p_0 = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 U^2}{2l_1^2} \quad (3)$$

і тиском  $p_\sigma$ , створюваним силою поверхневого натягу, який для поверхні з зовнішнім радіусом  $r$  становитиме

$$p_\sigma = \frac{\sigma}{r}, \quad (4)$$

де  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу.

Тиск  $p_\sigma$  притискає ПГО до поверхні анода, тобто діє в напрямку, протилежному  $p_1$ . Тому товщина ПГО на криволінійній ділянці поверхні буде менша, ніж на прямолінійній  $l_1 < l_0$ .

Виходячи зі сказаного вище, справедливою є рівність

$$p_0 = p_1 - p_\sigma. \quad (5)$$

Підставимо в рівність (5) значення  $p_0$ ,  $p_1$  і  $p_\sigma$  з формул (2)–(4). Після перетворень одержимо рівняння

$$\frac{1}{2l_1^2} = \frac{1}{2l_0^2} + \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0 U^2 r}. \quad (6)$$

Розглянемо ділянку прямолінійної поверхні площею  $\Delta S_0$ , через яку протікає струм силою  $I_0$ . Щільність струму на прямолінійній ділянці  $j_0$  становитиме:

$$j_0 = \frac{I_0}{\Delta S_0}. \quad (7)$$

Скориставшись законом Ома, (7) можна записати у вигляді

$$j_0 = \frac{U}{R_0 \Delta S_0}, \quad (8)$$

де  $R_0$  – опір парогозової оболонки на прямолінійній ділянці.

Виразимо опір ПГО через питомий опір парогозової оболонки  $\rho$ :

$$R_0 = \rho \frac{l_0}{\Delta S_0}. \quad (9)$$

Після підстановки (9) у вираз (8) і перетворення одержимо:

$$j_0 = \frac{U}{\rho l_0}. \quad (10)$$

Щільність струму на криволінійній ділянці  $j_1$  можна представити аналогічно (10)

$$j_1 = \frac{U}{\rho l_1}. \quad (11)$$

Виразивши з (10) і (11) значення  $l_0$  і  $l_1$  і підставивши їх в (5), після перетворення одержимо

$$j_1 = \sqrt{j_0^2 + \frac{2\sigma}{\rho^2 \varepsilon \varepsilon_0 r}}. \quad (12)$$

Аналіз рівнянь (10) і (11) дозволяє стверджувати, що добуток щільності струму та товщини парогозової оболонки є рівною величиною для будь-якої ділянки поверхні. Назвемо цю величину  $k$ . Тоді

$$k = j_0 l_0 = j_1 l_1 = \frac{U}{\rho} \quad (13)$$

З (13) виразимо питомий опір через напругу та коефіцієнт  $k$  і підставимо у вираз (12). Одержимо:

$$j_1 = \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2\epsilon\epsilon_0 r}} \quad (14)$$

Ця формула описує вплив радіуса кривизни оброблюваної поверхні та робочої напруги на щільність струму та дозволяє визначити щільність струму навколо циліндричної поверхні на будь-якій стадії розмірної обробки.

Величина  $j_0$  характеризує щільність струму на плоскій поверхні при рівних із циліндричною поверхнею умовах обробки (температура електроліту, робоча напруга, глибина занурення). Її значення визначається з отриманих експериментальним шляхом номограм залежно від напруги, температури та глибини занурення (рис. 2).

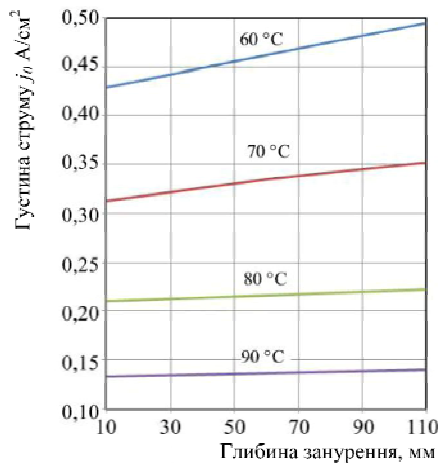


Рис. 2. Залежність  $j_0$  від температури електроліту та глибини занурення при робочій напрузі 280 В

Для експериментальної перевірки залежності (14) проводили вимір робочого струму при обробці циліндричних зразків зі сталі 12Х18Н9 довжиною 50 мм діаметром 0,5; 1,0; 1,5; 1,8; 2,0; 2,5; 4,0 і 6,0 мм. Обробку здійснювали в 4 %-м розчині сульфату амонію при робочій напрузі 280 В. Температура електроліту становила  $(80 \pm 2)^\circ\text{C}$ . Глибина занурення зразків в електроліт – 20 мм. Вимірювання сили струму проводили за допомогою цифрового амперметра, послідовно включеного в ланцюг.

За обмірюваними значенням сили струму була розрахована щільність струму для кожного зі зразків. На підставі отриманих даних побудована залежність, що характеризує вплив радіуса кривизни на щільність струму (рис. 3). Експериментальна залежність підтверджує дані, отримані розрахунковим методом за формулою (14).

При розрахунках величина  $j_0$  згідно з вищевказаною номограмою (рис. 2) приймається рівною  $0,21 \text{ А/см}^2$ , а

також використовувався коефіцієнт  $m = \frac{2k^2\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$ , що скла-

дається з постійних величин. Його експериментально встановлене значення становить  $8,02 \cdot 10^3$ .

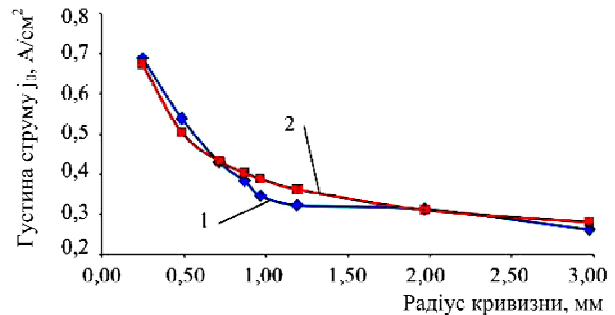


Рис. 3. Експериментальна та розрахункова залежності щільності струму від радіуса кривизни:

1 – експериментальні; 2 – розрахункові дані

З формули (1) випливає, що об'ємна швидкість розмірного знімання при обробці становить

$$v = I k_V \eta_a \quad (15)$$

Замінивши в (15) силу струму  $I$  добутком щільності струму  $j_1$  на площу поверхні циліндра, після перетворень одержимо

$$v_{\text{цил}} = 2\pi r L k_V \eta_a \sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2\epsilon\epsilon_0 r}} \quad (16)$$

де  $L$  – довжина циліндра.

Виведемо формулу для розрахунків тривалості розмірної обробки. Нехай за проміжок часу  $dt$  із циліндричної поверхні радіусом  $r$  віддаляється нескінченно малий шар металу товщиною  $dr$ .

Об'ємну швидкість розмірного знімання можна представити як відношення видаленого обсягу шару до проміжку часу, за який цей шар видаляється:

$$v_{\text{цил}} = \frac{2\pi r L dr}{dt} \quad (17)$$

Після підстановки (17) в (16) і перетворення одержимо

$$dt = \frac{1}{k_V \eta_a} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2\sigma}{U^2\epsilon\epsilon_0 r}}} \quad (18)$$

Загальний час, необхідний для знімання металу із циліндра з вихідним радіусом  $R_0$  до кінцевого радіуса  $R_1$ , визначиться за формулою:

$$t = \frac{1}{k_V \eta_a} \int_{R_1}^{R_0} \frac{dr}{\sqrt{j_0^2 + \frac{2k^2 \sigma}{U^2 \epsilon \epsilon_0 r}}}. \quad (19)$$

### Висновки

1. Проведені теоретичні та експериментальні дослідження розмірного знімання показують, що щільність струму є величиною, яка визначає інтенсивність останнього.

2. Щільність струму залежить від технологічних параметрів процесу ЕПО та зменшується зі зростанням температури та підвищенням робочої напруги. Зі збільшенням глибини занурення щільність струму зростає.

3. Фактором, що виявляє основний вплив на щільність струму на розмірне знімання при ЕПО циліндричних поверхонь, є радіус кривизни. Залежність щільності струму від радіуса кривизни носить гіперболічний характер. При зменшенні радіуса кривизни значно збільшується щільність струму. При температурі

електроліту 80 °С, глибині занурення 20 мм і робочій напрузі 280 В щільність струму для циліндра діаметром 6 мм становить 0,28 А/см<sup>2</sup>, а для циліндра діаметром 1 мм – 0,50 А/см<sup>2</sup>.

4. Отримані математичні залежності дозволяють виконувати розрахунки при розробці технологічних процесів формоутворення точних деталей обертання методом ЕПО. Результати роботи були використані при створенні технології виготовлення циліндричних багатоступінчастих ультразвукових хвилеводів для руйнування тромбів.

### Список літератури

1. Станишевский В. К. Способ электрохимической обработки / Станишевский В. К. – М. : Наука, 1995. – 345 с.
2. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки / [Г. Л. Амитан, И. А. Байсулов, Ю. М. Барон и др.] ; под общ. ред. В. А. Волосатова ; под. общ. ред. В. А. Волосатова. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.
3. Шубин А. С. Курс общей физики / А. С. Шубин. – 2-е изд. – М. : Высш. шк., 1996. – 480 с.

Одержано 22.05.2017

### Пономаренко А.М., Хандюк Н.В., Рога М.П. Технология размерного съема металла при электролитно-плазменной обработке цилиндрических поверхностей

*Представлена разработанная технология электролитно-плазменной обработки цилиндрических поверхностей, которая по своему качественному представлению является безопасной и более продуктивной технологией в сравнении с альтернативными видами (электрохимическая, механическая обработка). Разработана модель размерного снятия материала для количественной оценки размерного снятия в процессе электролитно-плазменной обработки. Установлена связь интенсивности размерной электролитно-плазменной обработки с технологическими параметрами процесса и геометрией обрабатываемой детали обращения.*

**Ключевые слова:** электролитно-плазменная обработка, обрабатываемая деталь-анод, электролит, анодное растворение металла, междуэлектродное пространство, плотность тока, радиус кривизны поверхности.

### Ponomarenko A., Khanduk N, Roga M. Technology dimensional metal removal in electrolyte-plasma treatment of cylindrical surfaces

*The developed technology of electrolytic-plasma treatment of cylindrical surfaces, which, by its quality presentation is safer and more productive technology in comparison with alternative types (electrochemical machining) was presents. The dimensional model of material removal for the quantitative assessment of dimensional lifting in the process of electrolyte-plasma processing was designed. The relation of the intensity dimension plasma electrolytic treatment technological process parameters and geometry of the workpiece treatment was established.*

**Key words:** electrolytic-plasma treatment, the workpiece is the anode, the electrolyte, the anodic dissolution of metal, interelectrode space, the current density, the radius of curvature of the surface.