

ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ МІКРОГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ ДРОТЯНОМУ ВИРІЗАННІ ПОВНОГО ЗЙОМУ

Осипенко В. І., *д.т.н., професор, завідувач кафедри ОПХВ та ВВП,*
Горобець О. І., *аспірант кафедри ОПХВ та ВВП*
Черкаський державний технологічний університет,
бул. Шевченка, 460, м. Черкаси,
osip5906@rambler.ru, olexa_molotov@ukr.net

Анотація. Отримано та обґрунтовано основні теоретичні та емпіричні рівняння взаємозв'язку параметрів мікрогеометрії поверхневого шару деталей з енергетичними та теплофізичними умовами електроерозійного дротяного вирізання (ЕЕДВ). Практичне використання отриманих результатів дає можливість визначення енергетичних і теплофізичних умов ЕЕДВ, які забезпечують необхідні значення параметрів шорсткості поверхневого шару оброблених поверхонь.

Ключові слова: теплові процеси, дротяний електрод-інструмент, руйнування електродів, теплофізичні параметри, мікрогеометрія, шорсткість.

REGULARITIES OF SHAPING OF MICROGEOMETRIC PARAMETERS OF SURFACE LAYER DURING ELECTRIC DISCHARGE WIRE CUTTING WITH COMPLETE REMOVAL

Osipenko V. I., *Dr.Tech.Sc., professor, the head of OPHV and VNP Department,*
Gorobets O. I., *postgraduate of OPHV and VNP Department,*
Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy,
osip5906@rambler.ru, olexa_molotov@ukr.net

Abstract. The basic theoretical and empirical equations of the correlation of surface layer microgeometric parameters of the details with thermal and energy conditions of electric discharge wire cutting (EDWC) are obtained and grounded. Practical use of the results makes it possible to determine energy and thermal EDWC conditions which provide necessary values of parameters of the roughness of surface layer of treated surfaces.

Keywords: thermal processes, wire electrode-tool, destruction of electrodes, thermal parameters, microgeometry, roughness.

Вступ. Електроерозійна вирізна обробка непрофільованим дротяним електродом, що вже стала класичною, широко застосовується в сучасному виробництві при виготовленні складнопрофільних деталей інструментального виробництва. Надзвичайно висока точність виготовлення деталей незалежно від складності формоутворюючого контуру, відсутність обмежень при обробці мініатюрних деталей з матеріалів, що важко піддаються обробці, роблять електроерозійне дротяне вирізання (ЕЕДВ) в багатьох випадках єдиним можливим методом обробки. Разом з тим при проектуванні технологічних процесів ЕЕДВ, особливо в царині прогнозування мікрогеометричних параметрів поверхневих шарів, домінують емпіричні підходи. Існуючі

рівняння для розрахунку параметрів шорсткості не враховують реальні теплові потоки та гідродинамічні особливості формування геометричних характеристик одичної ерозійної лунки. Це призводить до того, що коефіцієнти, які використовуються в цих рівняннях, мають широкий розкид і слабо прив'язані до енергетичних параметрів режиму різання і теплофізичних характеристик матеріалу, що обробляється. Проблемі створення теоретичних науково обґрунтованих методів прогнозування мікрогеометричних характеристик поверхневих шарів сформованих ЕЕДВ і присвячена ця стаття.

Метою роботи є встановлення можливостей ЕЕДВ в управлінні параметрами якості поверхневого шару деталей.

Постановка задачі:

1. Встановити фізичну картину формування параметрів мікрогеометрії поверхневого шару деталей при ЕЕДВ та можливості технології в забезпеченні необхідних значень.

2. Отримати теоретичні та емпіричні рівняння взаємозв'язку параметрів мікрогеометрії поверхневого шару деталей з енергетичними і теплофізичними умовами ЕЕДВ.

3. Розробити алгоритм визначення енергетичних і теплофізичних умов ЕЕДВ, що забезпечують необхідні значення параметрів якості поверхневого шару.

Основний матеріал. Проаналізуємо типовий стан мікрогеометрії поверхні після електроерозійного дротяного вирізання.

Внаслідок специфіки її отримання поверхня, що формується електроерозійним способом, має характерну структуру. Вона отримується перекриттям лунок від одиничних електричних розрядів енергією від 0,3 до 15 мДж. При площі перетину каналу розряду від $2 \cdot 10^{-9}$ до $8 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2$ щільність потужності відповідає режиму плавлення з випаровуванням. Отже, залежно від енергії імпульсу на поверхні деталі може утворитися зона термічного впливу товщиною до 0,1 мм, яка може бути зменшена до 0,01–0,03 мм подальшими проходами. На поверхні є ділянки (на дні одиничних лунок), що мають гладкий характер, а також ділянки (на межі лунок), які мають відносно різку зміну висоти. Залежно від складу робочої рідини (електрична провідність, жорсткість, наявність поверхнево-активних речовин і забруднення продуктами ерозії) і електричних параметрів розряду форма лунки може варіюватися від близької до кульового сегмента до майже циліндричної.

Сутність процесу електричної ерозії полягає в перетворенні електричної енергії розряду, що виникає між двома електродами, розділеними шаром діелектрика, в теплову енергію, за рахунок якої відбувається руйнування матеріалу і формування показників якості поверхневого шару деталей.

Енергія, що виділилася при пробі між електродного проміжку, за законом збереження енергії, повністю переходить у теплову енергію, яка, в свою чергу, витрачається на нагрівання і плавлення матеріалів електродів, на нагрівання і випаровування робочої рідини, на створення газової бульбашки. Оскільки напруга до електродів підводиться короткими імпульсами, їх тривалість можна розрахувати за залежністю [1–3]:

$$t_i = \frac{I}{f \cdot q} \quad (1)$$

Електричну енергію між електродами можна визначити за залежністю [1, 5, 6]:

$$E_i = \int_0^{t_i} U \cdot I \cdot dt_i \quad (2)$$

У залежностях (1) і (2) U – напруга, що подається на електроди, В; I – сила струму, А; f – частота проходження імпульсів, Гц; q – сквапність імпульсів; t_i – тривалість імпульсів.

Для найбільш точного розрахунку мікрогеометричних характеристик одиничної ерозійної лунки скористаємося методичними підходами роботи [4], що дозволяє на основі чисельного розв'язку задачі Стефана в трифазній постановці з можливого набору енергетичних режимів генератора коротких імпульсів (ГКІ), величини міжелектродного проміжку ($I_{мен}$), теплофізичних характеристик поверхневих шарів дротяного електрода-інструмента (ДЕІ) розрахувати найбільш раціональне значення загальної електричної енергії одиничного імпульсу $E_i(I_{max}, \tau_i)$, розподіл $E_i(I_{max}, \tau_i)$ між анодом, катодом та стовпом розряду (E_a, E_k, E_c) і з урахуванням фізико-хімічних властивостей робочої рідини (в'язкість, густина, коефіцієнт поверхневого натягу) відповідно функцію розподілу інтенсивності теплового потоку від дії плазми каналу одиничного іскрового розряду $q(r, t)$, яка для заданого матеріалу заготовки – анода забезпечує максимально можливу ерозійну руйнацію одиничним розрядом, тобто об'єми розплавленого і випаруваного матеріалу та коефіцієнт видалення розплаву з ерозійної лунки ($V_{пл}, V_{вип}, K_{вип}$) і відповідні геометричні характеристики одиничної ерозійної лунки – об'єм, діаметр, глибину (V_l, d_l, h_l).

Мікрогеометричні характеристики поверхні при електроерозійній обробці формуються за рахунок лунок, що взаємно перекриваються, які утворюються в результаті видалення об'єму матеріалу імпульсами струму. Зробимо припущення про те, що:

- всі лунки однакові;
- режими обробки усереднюються;
- фізико-механічні властивості матеріалів незмінні в процесі обробки;
- коефіцієнт перекриття лунок є постійним упродовж всієї обробки і дорівнює своєму середньому значенню ($b = 1,5$).

Розрахункову схему для визначення параметрів шорсткості в цьому випадку можна представити у вигляді, зображеному на рис. 1.

Оскільки форма лунки є близькою до сферичної, то її об'єм, що відповідає об'єму видаленого металу, можна визначити як об'єм кульового сегмента за залежністю

$$V = \frac{1}{3} \cdot (\rho \cdot h_l^2 \cdot (3 \cdot R - h_l)), \quad (3)$$

де R – радіус утворюючої сфери (рис. 1);
 h_l – глибина лунки (рис. 1).

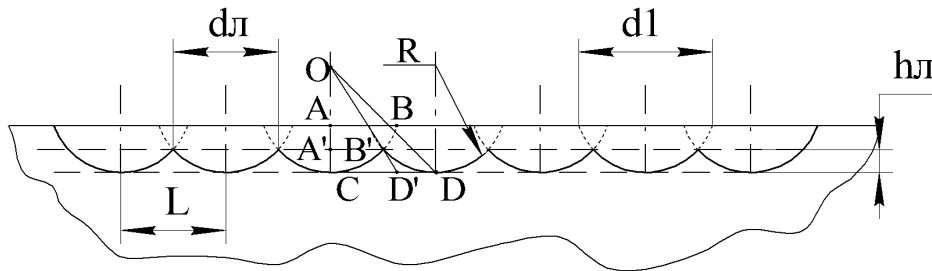


Рис. 1. Схема формування параметрів шорсткості поверхні

$$b = \frac{d_l}{L}. \quad (4)$$

$$R = \frac{2 \cdot b}{2 \cdot b - 1} \cdot h_l. \quad (5)$$

Підставляючи (5) в (3) та виражаючи з отриманої залежності глибину лунки, маємо таке рівняння:

$$h_l = \sqrt[3]{\frac{(2 \cdot b - 1) \cdot V}{(4 \cdot b + 1)}}. \quad (6)$$

З урахуванням зроблених допущень одержуємо залежність для розрахунку глибини лунки, а, отже, і параметрів R_{max} і Rz . [7–9]:

$$Rz = R_{max} = h_l. \quad (7)$$

Для визначення параметра шорсткості R_p скористаємося розрахунковою схемою, зображеною на рис. 2. При вирішенні цього

Зважаючи на зроблені припущення, можна стверджувати, що висотні параметри шорсткості R_{max} і Rz дорівнюють глибині лунки і тому завдання відшукування параметрів шорсткості зводиться до визначення глибини лунки, яка отримується при електроерозійній обробці.

З геометричних побудов (рис. 1) та враховуючи зроблені припущення, а також знаючи, що відношення діаметра одиначної лунки до відстані між центрами сусідніх лунок – це коефіцієнт перекриття (4), отримаємо залежність, що зв'яже радіус утворюючої сфери і глибину лунки (5).

завдання необхідно визначити положення середньої лінії, яке знаходиться з умови рівності площ:

$$S = S_1 + S_2. \quad (8)$$

Діаметр лунки пов'язаний з її глибиною виразом (9), який отримано з геометричних побудов при розгляді поданої схеми формування параметра R_p .

$$d_l = h_l \cdot \sqrt{\frac{8 \cdot b + 4}{2 \cdot b - 1}}. \quad (9)$$

Прийнявши $BC = K$ і $CD = a \cdot h_l$ (рис. 2), отримуємо, що для знаходження положення середньої лінії необхідно визначити значення a . Розглядаючи трикутник OCB , знаходимо вираз для визначення значення K .

Підставляючи в отримане вираз залежність (5) в результаті отримуємо:

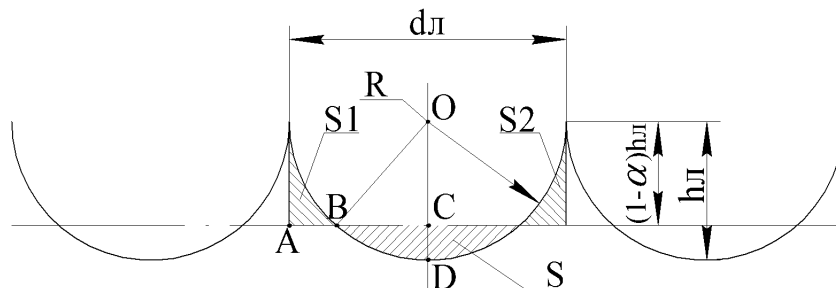


Рис. 2. Схема для розрахунку параметра шорсткості R_p

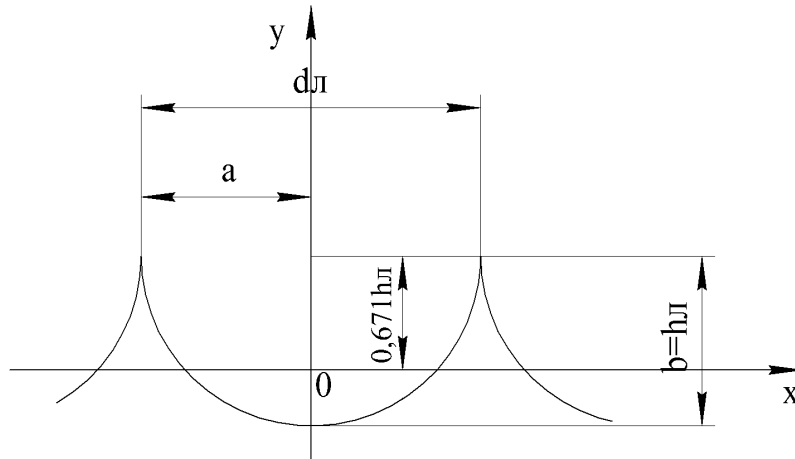


Рис. 3. Розрахункова схема для визначення параметра шорсткості Rz

$$K = h_n \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot a}{2 \cdot b - 1} + a^2} \quad (10)$$

Знаючи K , визначимо величину AB за залежністю

$$AB = h_n \cdot \left[\frac{\left(0,5 \cdot \sqrt{8 \cdot \beta + 4} - \sqrt{4 \cdot \beta \cdot a + 2 \cdot a^2 - a^2} \right)}{\sqrt{2 \cdot \beta - 1}} \right] \quad (11)$$

Введемо позначення:

$$\sqrt{\frac{4 \cdot b \cdot a}{2 \cdot b - 1} + a^2} = a ;$$

$$\left(\frac{0,5 \cdot \sqrt{8 \cdot \beta + 4} - \sqrt{4 \cdot \beta \cdot a + 2 \cdot a^2 - a^2}}{\sqrt{2 \cdot \beta - 1}} \right) = b ,$$

тоді отримуємо, що $K = a \cdot h_n$, а $AB = b \cdot h_n$.

Знаходимо площі S, S_1, S_2 за залежностями:

$$S = \frac{p}{2} \cdot K \cdot CD = \frac{a \cdot p \cdot a}{2} \cdot h_n^2, \quad (12)$$

$$\begin{aligned} S_1 = S_2 &= \frac{l}{2} \cdot AB \cdot h_n \cdot (1 - a) = \\ &= \frac{l}{2} \cdot h_n^2 \cdot (1 - a) \cdot b \end{aligned} \quad (13)$$

Підставляючи отримані залежності в (8), замінюючи a і b їх значеннями і приймаючи $b = 1,5$, отримуємо таке рівняння для визначення a :

$$0,33 \cdot a^4 - 0,84 \cdot a^3 - 10,86 \cdot a^2 + 16,04 \cdot a - 5,02 = 0 \quad (14)$$

За розрахунковою схемою (рис. 2) видно, що значення a лежать в проміжку від 0 до 1, тобто значення менше одиниці, а якщо так, то коефіцієнтами рівняння (14) a^2 і a^3 можна знехтувати. Тоді отримуємо таке рівняння для розрахунку параметра a :

$$a^2 - 1,477 \cdot a + 0,46 = 0. \quad (15)$$

З рішення рівняння (15) одержуємо, що $a = 0,329$, тоді параметр шорсткості Rp можна розрахувати за залежністю

$$Rp = (1 - a) \cdot h_n = 0,671 \cdot Rz. \quad (16)$$

Для визначення параметра шорсткості Ra скористаємося розрахунковою схемою, зображеною на рис. 3. З розглянутої схеми видно, що крива поверхні лунки з достатньою для практики точністю може бути описана рівнянням еліпса:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1, \quad (17)$$

причому $a = \frac{d_n}{2}$; $b = h_n$ і $-a \leq x \leq a$; $-b \leq y \leq 0$.

Тоді для знаходження параметра Ra скористаємося залежністю

$$Ra = \frac{l}{l} \cdot \int_0^l y(x) dx, \quad (18)$$

де l – базова довжина для визначення шорсткості поверхні.

Оскільки всі лунки однакові, то їх кількість на базовій довжині можна визначити як

$\frac{l}{d_n}$. Виходячи з рівняння еліпса $y(x)$ і підставляючи його в (18), а також підставляючи всі відомі величини і розбиваючи межі інтегрування, одержуємо залежність для розрахунку параметра шорсткості Ra .

$$Ra = \frac{l}{d_n} \cdot \left[\begin{array}{l} 0,173 \cdot d_n \cdot h_n + \\ - \int_{-d_n}^{-0,742 \cdot d_n} \left(\sqrt{\frac{d_n^2}{4} - x^2} \right) dx + \\ 0,742 \cdot d_n \int_{-0,742 \cdot d_n}^{d_n} \left(\sqrt{\frac{d_n^2}{4} - x^2} \right) dx - \\ \frac{d_n}{2 \cdot h_n} \int_{0,742 \cdot d_n}^{d_n} \left(\sqrt{\frac{d_n^2}{4} - x^2} \right) dx \end{array} \right] \cdot (19)$$

Проінтегрувавши отриманий вираз, прийнявши $b = 1,5$ і замінивши діаметр лунки глибиною, отримуємо, що параметр шорсткості Ra можна розрахувати за залежністю:

$$Ra = 0,398 \cdot Rz . \quad (20)$$

Середній крок нерівностей профілю, зважаючи на зроблені припущення, визначається діаметром утвореної лунки, який пов'язаний з глибиною лунки виразом (9). Приймаючи коефіцієнт перекриття лунок рівним його середньому значенню, отримуємо розрахункову залежність для визначення середнього кроку нерівностей профілю:

$$Sm = 4,5 \cdot Rz . \quad (21)$$

Експериментальна перевірка отриманих рівнянь підтвердила добрий збіг теоретичних та експериментальних даних.

Висновки:

1. Запропоновано та обгрунтовано схему визначення параметрів шорсткості поверхонь, сформованих електроерозійним дротяним вирізанням.

2. Спираючись на запропоновану схему та зроблені обгрунтовані припущення, одержано рівняння для прогнозування параметрів шорсткості отриманих поверхонь, з використанням методики розрахунку геометрії одиначної ерозійної лунки на основі чисельного розв'язання задачі Стефана в трифазній постановці.

3. Розрахунки параметрів шорсткості сталевих деталей за отриманими рівняннями та розрахованими геометричними характеристиками одиначної ерозійної лунки (V_b , d_b , h_n) дають задовільне збігання (похибка не пере-

вищує 8 %) з експериментально отриманими профілограмами.

Список літератури

1. Гулий Г. А. Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г. А. Гулий. – М. : Машиностроение, 1978. – 168 с.
2. Лазаренко Б. Р. Электрические способы обработки материалов и их применение в машиностроении / Б. Р. Лазаренко. – М. : Машиностроение, 1978. – 40 с.
3. Попель Л. Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов / Л. Я. Попель. – Л. : Машиностроение, 1971. – 544 с.
4. Осипенко В. І. Фізико-технологічні основи електроерозійного дротяного вирізання : дис. ... докт. техн. наук / Осипенко В. І. – Черкаси, 2006.
5. Физические величины : справочник / [А. П. Бабичев, Н. А. Бабушкина, А. Н. Братковский и др.]; под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.
6. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М. : Наука, 1979. – С. 942.
7. Бішутін С. Г. Теоретичний розрахунок параметрів шорсткості поверхні при шліфуванні та електроерозійній обробці / С. Г. Бішутін, С. Ю. С'янов // Обробка металів. – 2001. – № 1 (12).
8. Суслов А. Г. Формування і розрахунок шорсткості поверхні деталей при електроерозійній обробці / А. Г. Суслов, С. Ю. С'янов // Прогресивні технології та системи машинобудування : міжнар. зб. наук. праць. – Вип. 10. – Донецьк : ДонДТУ, 2000. – С. 239–244.
9. С'янов С. Ю. Факторы, которые влияют на формирование параметров шероховатости при электроэрозионной обработке : тез. докл. молодежной науч.-техн. конф. «Славянских держав» / С. Ю. С'янов ; под ред. О. А. Горленко. – Брянск: БГТУ, 2000. – С. 74–76.
10. Инютин В. П. Микрогеометрические показатели качества поверхности при электроэрозионной обработке / В. П. Инютин, С. Ю. С'янов // Качество машин : сб. тр. 4-й междунар. науч.-техн. конф., 10-11 мая 2001 г. : в 2 т. / под общ. ред. А. Г. Сулова. – Брянск: БГТУ, 2001. – Т. 2. – С. 50–51.

References

1. Guliy, G. A. (1978) Scientific fundamentals of discharge-pulsing technologies. Moscow: Mashinostroyenie, 168 p. [in Russian].
2. Lazarenko, B. R. (1978) Electrical methods of materials processing and their applications in engineering. Moscow: Mashinostroyenie, 40 p. [in Russian].
3. Popil, L. Y. (1971) The handbook of electric and ultrasonic methods of materials processing. L.: Mashinostroyenie, 544 p. [in Russian].
4. Osipenko, V. I. (2006) Physical and technological bases of electric wire cutting : Dis. of D.Sc. Cherkasy [in Ukrainian].
5. Babichev, A. P., Babushkina, N. A., Bratkovsky, A. N. et al. (1991) Physical sizes: Directory. In: I. S. Grigoriev, E. Z. Meylihov (eds.) Moscow: Enerhoatomizdat, 1232 p. [in Russian].
6. Yavorsky, B. M. & Detlaf, A. A. (1979) The handbook of physics. Moscow: Nauka, p. 942 [in Russian].
7. Bishutin, S. G. & S'yanov, S. Yu. (2001) Theoretical calculation of parameters of surface roughness at grinding and EDM processing– *Obrobka metaliv*, № 1 (12) [in Ukrainian].
8. Suslov, A. G. & S'yanov, S. Yu. (2000) The formation and calculation of details surface roughness at EDM processing. *Progresyvni tehnologii ta systemy mashinobuduvannya: collected intern. scient. papers.* – Donetsk State Technical University, (10), pp. 239-244 [in Ukrainian].
9. S'yanov, S. Yu. (2000) Factors influencing roughness parameters at EDM processing. In: *brief outline report of youth scient. conf. of "Slavic states"*. Gorlenko O. A. (Ed.). Bryansk: BHTU, pp. 74-76 [in Russian].
10. Inyutin, V. P. & S'yanov, O. A. (2001) Microgeometric coefficients of surface quality at EDM processing. *Kachestvo mashin: collected papers of the 4th intern. scient. and techn. conf.*, (10-11 May): in 2 vol. A. G. Suslov (Ed.). Bryansk: BHTU, (2), pp. 50-51 [in Ukrainian].