

## Секція 4

### Теоретичні та прикладні питання математичної фізики

УДК 621.9.048

#### МАТЕМАТИЧНИЙ АНАЛІЗ ВПЛИВУ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ НА ФОРМУВАННЯ ПОКРИТТЯ ПІД ЧАС ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

доц. О.П. Гапонова, доц. Т. І. Жиленко, доц. Н. В. Тарельник,

ст. В. М. Безрук, маг. Н. Р. Голуб

Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, Суми, 40007

gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Існує багато методів модифікації поверхні із покращеними механічними характеристиками. Перспективним методом є електроіскрове легування (ЕІЛ). ЕІЛ – це процес, який може застосовуватися для модифікації робочих поверхонь при утворенні зносостійких та антикорозійних покриттів для покращення та продовження терміну служби деталей та інструмента, а також для відновлення розмірів деталей. У процесі нанесення покриття тривалість електричних імпульсів триває від кількох мікросекунд до мілісекунд, за цей час матеріал електрода осаджується на поверхні катода (оброблюваної деталі) і створюється захисний шар. Низька енергоємність процесу та здатність до формування міцного з'єднання покриття-основа є одними із значних переваг ЕІЛ. На даний час опублікована достатня кількість робіт, присвячених експериментальному дослідженню модифікованих поверхонь методом ЕІЛ [1-3]. Однак не створено математичної моделі електроіскрового легування, яка б дозволяла прогнозувати властивості отриманих покриттів. Це відбувається через складність математичного опису процесу ЕІЛ і його багатопараметричності.

Електроіскрове легування часто описують як процес мікродугового зварювання. Під час процесу електростатичного розряду електрод, що осаджує, миттєво контактує з поверхню підкладки легким тиском [4, 5]. Необхідно підтримувати рух електрода щоб запобігти прилипанню легувального електрода (анода) до поверхні підкладки (катода). Крім того, існують важливі параметри процесу ЕІЛ – параметри електрода, підкладки, середовища та електричні характеристики. Зміна будь-який із цих параметрів призведе до зміни властивостей і якості модифікованої поверхні.

Електричні характеристики процесу ЕІЛ чинять найбільший вплив на якість покриттів та швидкість їх осадження [5]. Збільшення енергії розряду збільшує швидкість осадження. Енергія розряду  $E_p$  визначається як:

$$E_p = \int_0^{t_p} V(t) \cdot I(t) dt$$

де  $V(t)$  – функція напруги під час розряду,  $I(t)$  – функція струму під час розряду, а  $t_p$  – тривалість імпульсу.

Змінні, які впливають на режимну енергію розряду, включають ємність, зарядну напругу, індуктивність та питомий опір ланцюга. Ємність і зарядна напруга змінюють енергію розряду шляхом зміни тривалості розряду та пікового струму відповідно. Зарядна напруга контролює силу струму, що протікає в конденсаторі. Чим більша ємність, тим більшою буде тривалість розряду для заданого потенціалу напруги. Питомий опір ланцюга має негативний вплив на енергію розряду, обмежуючи потік струму ланцюга [5].

Отже метою роботи є розробка математичної моделі впливу теплових процесів на формування покриття методом електроіскрового легування та визначення найбільшої потужності генератора шляхом встановлення зв'язків з кількістю теплових процесів на поверхні виробу, які прямопропорційно залежать від цієї потужності, та формується найміцніше покриття для електрода заданого діаметра.

При нанесенні покриття методом електроіскрового легування оперують потужністю генератора імпульсів  $W$ ; швидкістю переміщення електрода,  $v$ ; товщиною покриття, що

наноситься,  $h$ . Оскільки збільшити температуру катода можна за допомогою двох джерел, загальна потужність яких можна зрівняти з потужністю генератора імпульсів:

$$q_1 + q_2 = q_0 = \eta \frac{W}{S_e}, \quad (1)$$

де  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії генератора імпульсів,  $\eta \approx 0,8$ ;

$W$  – потужність розряду при ЕІЛ.

При розрахунку оптимального режиму нанесення покриттів необхідно вибрати найбільшу швидкість руху джерела. Для системи оптимізації найпринятнішим критерієм є вираз ( $v = \max$ ).

$$W = \frac{\pi \rho L_{fe} d^3}{4 \eta p} h v. \quad (6)$$

$L_{fe}$  – прихована теплота плавлення матеріалу електрода;

$d$  – діаметр електроду.

$$p = \sqrt{\frac{\Lambda_e C_e \rho_e}{\Lambda C \rho}},$$

де  $\Lambda_e, C_e, \rho_e, \Lambda, C, \rho$  – коефіцієнти теплопровідності, теплоємності та щільності відповідно електрода і виробу

За цією формулою встановлюється залежність між товщиною покриття, швидкістю руху анода і потужністю генератора імпульсів в конкретних умовах. Відповідно до (6) побудовано графіки залежностей між швидкістю руху анода та потужністю генератора при заданих значеннях діаметру електроду.

Отже, можна зробити висновок, що чим більший діаметр електрода, тим вища потужність генератора необхідна для підвищення швидкості аноду і створення міцного покриття матеріалу. Для формування покриття з високою адгезією до основи рекомендовано застосовувати анод (легуючий електрод) діаметром 4-4,5 мм зі швидкістю переміщення 0.4 - 0.5 см/с, значення якої буде найоптимальнішим за максимальної потужності генератора при отриманні покриття товщиною 20 мкм. Вибір таких параметрів легування дозволить отримати покриття з високим зчепленням до основного матеріалу.

### Список використаних джерел:

1. Створення функціональних покриттів на поверхні маловуглецевої сталі багатостадійним електроіскровим легуванням хромом та графітом у насичувальних середовищах / Є. В. Іващенко, Г. Г. Лобачова, Н. А. Шаповалова, К. Є. Ігнасюк. *Проблеми тертя та зношування*. 2016. 2 (71). С. 62-66.

2. Гапонова О. П. Аналіз якості комплексних сульфоцементованих покриттів, отриманих методом електроіскрового легування. Наукові нотатки. 2019. Вип. 67. С. 24–28. <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2019.67.4>

3. Забезпечення захисту поверхонь торцевих імпульсних ущільнень турбомашин шляхом формування зносостійких наноструктур / В.Б.Тарельник, Є.В. Коноплянченко, О.П. Гапонова, Н.В. Тарельник. Суми: Видавництво "Університетська книга". 2022. 250 с.

8. *Welding Handbook*. Vol. 3, 9th ed. American Welding Society, Miami, FL. 2007. P. 598 – 602.

9. Reynolds L., Holdren R. L., Brown L.E. Electro-spark deposition. *Advanced Materials and Processes*. 2003. Vol. 161. No. 3. P. 35-37.