

О.П. Гапонова¹, Т. І. Жиленко¹, Н. В. Тарельник², В. М. Безрук¹

¹Сумський державний університет

²Сумський національний аграрний університет

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

Розглянуті перспективи застосування електроіскрового легування з метою забезпечення необхідної якості поверхні. Проаналізовані параметри, що впливають на якість модифікованої поверхні. Запропонована математична модель, що враховує кількість теплових процесів на поверхні виробу. Модель заснована на рівнянні інтенсивності теплового потоку перенесеної енергії з урахуванням випаровування матеріалів у навколишнє середовище відповідно до закону збереження енергії. Це дозволяє описати процес розповсюдження тепла у покритті під час електроіскрового легування металевої поверхні. Під час її побудови враховано, що температура поверхні зміцнюваної деталі залежить від теплофізичних характеристик анода та катода, діаметру електрода, а також від швидкості переміщення легуючого електрода. Показано, що чим більший діаметр електрода, тим більша температура на межі покриття-основа, а отже краща адгезія покриття. Для отримання найкращого зчеплення покриття з основою необхідно використати електрод найбільшого діаметру 4,5 мм у поєднанні із низькою швидкістю переміщення електрода.

Ключові слова: електроіскрове легування, теплопровідність, катод, анод, адгезія, потужність розряду

O. P. Gaponova, T. I. Zhylenko, N. V. Tarelnyk, V. M. Bezruk

MATHEMATICAL ANALYSIS OF THE SURFACE MODIFICATION PROCESS BY ELECTRIC SPARK ALLOYING METHOD

The perspectives for the use of electrospark alloying to ensure the required surface quality are considered. The parameters influencing the quality of the modified surface are analyzed. A mathematical model is proposed that takes into account the number of thermal processes on the surface of the product. The model is based on the equation for the intensity of the transferred energy heat flux, taking into account the evaporation of materials into the environment in accordance with the law of conservation of energy. This makes it possible to describe the process of heat propagation in the coating during electrospark alloying of a metal surface. It was taken into account that the temperature of the hardened surface depends on the thermophysical characteristics of the anode and cathode, the diameter of the electrode, and also on the speed of movement of the alloying electrode. It is shown that the larger the electrode diameter, the higher the temperature at the coating-base interface, which means that the adhesion of the coating is better. To obtain better adhesion of the coating to the substrate, it is necessary to use the largest electrode diameter of 4.5 mm in combination with a low electrode movement speed.

Keywords: electrospark alloying, thermal conductivity, cathode, anode, adhesion, discharge power

Постановка проблеми.

Існує багато методів модифікації поверхні із покращеними механічними характеристиками, наприклад, гальванопластика, магнетронне напилення або плазмове напилення. Дуже тонкі шари можуть бути виготовлені шляхом осадження з парової фази. Деякі з цих методів є дорогими, і їх слід використовувати лише для унікальних застосувань, де висока вартість виправдана. Бувають випадки, коли вищевказані способи не підходять для досягнення бажаних характеристик.

На сьогодні, значного розвитку набули методи, що засновані на використанні концентрованих потоків енергії та речовини. Перспективним методом модифікації поверхні 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.

Ряд дослідників показали, що ефективним методом оцінки традиційного процесу ЕІЛ є використання теплових моделей, які визначають кількість осадженого матеріалу протягом одного імпульсу [4, 5].

Для того, щоб визначити товщину покриття, що наноситься необхідно припустити, що вся енергія, яка надходить до анода (електрода), під час встановленого процесу електроіскрового легування, витрачається на його часткове розплавлення і переноситься на катод. Причому тепло, що виділяється, передається крім катода через переміщений матеріал і в навколишнє середовище. Теплообмін із навколишнім середовищем відбувається за допомогою повітря. Повітря є поганим провідником тепла. Багато авторів вважають [6], що при використанні деяких матеріалів можлива поява обмеження товщини покриття, що формується на катоді, навіть при використанні найбільш комфортних режимів з позиції якісних показників і продуктивності процесу. Дане обмеження товщини відбувається через недостатню обізнаність у практичному використанні ЕІЛ. Тому проблема вдосконалення методу ЕІЛ та пошук можливостей цілеспрямованого управління ним є досить актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Електроіскрове легування часто описують як процес мікродугового зварювання [7]. Під час процесу електростатичного розряду електрод, що осаджує, миттєво контактує з поверхню підкладки легким тиском [8, 9]. Необхідно підтримувати рух електрода щоб запобігти прилипанню легувального електрода (анода) до поверхні підкладки (катода). Крім того, існують важливі параметри процесу ЕІЛ, що зведені до таблиці 1, і є унікальними для процесу ЕІЛ. Ці змінні включають параметри електроду, підкладки, середовища та електричні характеристики. Зміна будь-який із цих параметрів призведе до зміни властивостей і якості модифікованої поверхні.

Табл. 1.

Параметри процесу ЕІЛ [7]

Легуючий електрод	Підкладка (оброблюваний матеріал)	Навколишнє середовище	Електричні (режимні параметри)	Інші
Матеріал Геометрія Рух Швидкість переміщення Контактний тиск Орієнтація Напрямок застосування	Матеріал Поверхня Чистота і якість поверхні Температура Геометрія	Тип захисного газу (хімічний склад) Швидкість потоку Температура Геометрія потоку	Споживана потужність Напруга Ємність Частота іскри	Продуктивність Кількість проходів Перекриття проходів Тривалість іскри

Шляхом численних експериментальних досліджень було виявлено, що з часом у процесі ЕІЛ сповільнюється осадження анода на катод через процес випаровування в навколишнє середовище. Якщо використовувати сукупність всіх механічних та фізико-хімічних впливів на поверхню робочих електродів, то можна пояснити, чому товщина шару анода може мати певні обмеження. Також є припущення, що для визначення характеру росту і обмеження товщини шару, що формується необхідно використовувати фазові і структурні перетворення під впливом процесів багаторазового імпульсного теплового і механічного впливу на матеріал. Це призведе до виникнення в шарах матеріалу залишкових напружень I і II роду [10-13], що характеризуватиме їх кінцевий незворотний напружений стан.

Електричні характеристики процесу ЕІЛ чинять найбільший вплив на якість покриттів та швидкість їх осадження [9]. 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 [9].

Тривалість іскри процесу ЕІЛ зазвичай коливається від кількох мікросекунд до мілісекунд, що приблизно на три порядки менше, ніж в інших процесах імпульсного зварювання. Частота осадження може коливатися від 60 Гц до 4 кГц [7, 8]. Нагрівання підкладки відбувається приблизно протягом 1% робочого циклу [8], тоді як розсіювання тепла відбувається протягом балансу часу. Енергія розряду може коливатися від 0,1 Дж до 10 Дж [9]. Внаслідок короткої тривалості імпульсу та малої частки часу нагрівання підкладка під час нанесення покриття має температуру навколишнього середовища, тобто практично не нагрівається. Через це при ЕІЛ відбувається формування зони теплового впливу мінімальних розмірів, зменшується вірогідність або попереджаються металургійні зміни та зміна розмірів підкладки. Однак при обробці тонких виробів, дрібних деталей або деталей, які зазвичай потребують тривалішої обробки інколи необхідно застосовувати допоміжну систему охолодження.

Швидкість охолодження процесу ЕІЛ може досягати 10^{-10} °С/сек [14]. Швидке нагрівання та охолодження сприятливі для механічних властивостей покриттів. Швидке охолодження модифікованої поверхні часто призводить до наноструктурної або навіть аморфної будови деяких матеріалів [3]. Завдяки ефекту Холла-Петча така структура демонструє чудову стійкість до зносу та корозії порівняно з тими самими матеріалами у вихідній формі. Співвідношення Холла-Петча передбачає, що зі зменшенням розміру зерна межа текучості зростає [15].

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 електроду заданого діаметра.

Математична модель

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

W – потужність розряду при ЕІЛ.

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{W}{S_e} \cdot K \\ q_2 &= L_{fe} \cdot m_e \\ K &= 1 - \frac{2}{p+1} \\ p &= \sqrt{\frac{\Lambda_e C_e \rho_e}{\Lambda C \rho}} \end{aligned} \quad (2)$$

S_e – площа перерізу електрода; L_{fe} – прихована теплота плавлення матеріалу електрода; m_e – маса наплавленого в одиницю часу матеріалу електрода; $\Lambda_e, C_e, \rho_e, \Lambda, C, \rho$ – коефіцієнти теплопровідності, теплоємності та щільності відповідно електрода і виробу.

m_e – маса електрода, яка переноситься в одиницю часу,

$$m_e = \rho_e dhv. \quad (3)$$

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

З урахуванням випаровування матеріалів у навколишнє середовище (3-5%) рівняння інтенсивності теплового потоку перенесеної енергії матиме вигляд:

$$q_2 = \eta p \frac{W}{S_e} = m_e L_{fe} \quad (4)$$

За формулою (4) визначається швидкість розплавлення (нанесення) матеріалу легуючого електрода.

Тоді (4) з урахуванням (3) набуде вигляду:

$$\eta p \frac{4W}{\pi d^2} = \rho h d v L_{fe} \quad (5)$$

Отже

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

Також важливо врахувати в цьому процесі обмеження «знизу» – лінія рівних температур $T_{min} = T_{mel}$ та обмеження «зверху» - необхідна товщина покриття.

За цим співвідношенням 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 електрода.

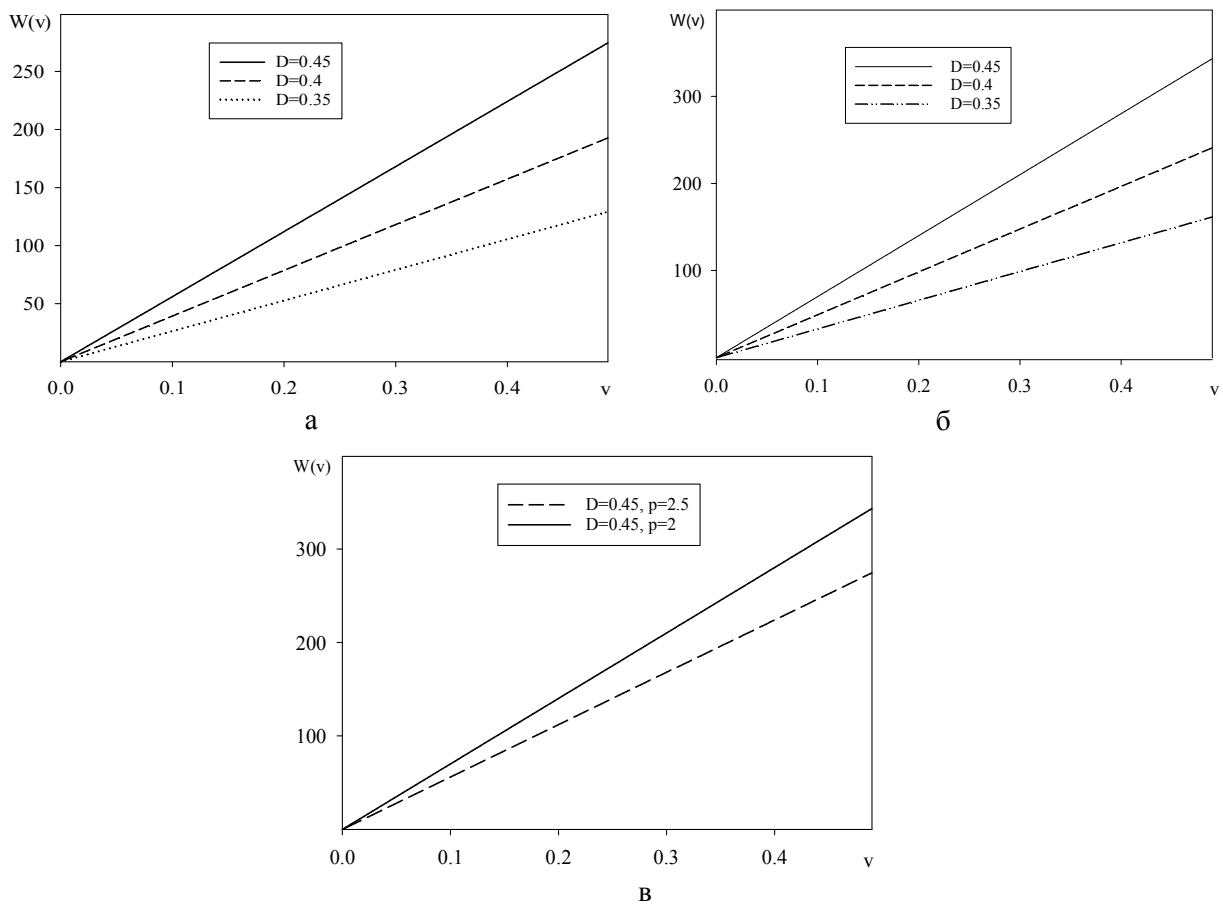


Рис. 1. Залежність швидкості руху анода від потужності генератора, якщо:
а – $D=0.45, 0.4, 0.35, p=2.5, h=20$; б – $D=0.45, 0.4, 0.35, p=2, h=20$; в – $D=0.45, p=2, p=2.5, h=20$

Отже, можна зробити висновок з рисунку 1, що чим більший діаметр електрода, тим вища потужність генератора необхідна для підвищення швидкості аноду і створення міцного покриття матеріалу. А от залежність від параметру p , що визначається за формулою (2), обернено пропорційна, чим більше його значення, тим менша потужність генератора необхідна незалежно від діаметру електрода. 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.

Висновки.

1. Розглянуті особливості застосування електроіскрового легування з метою забезпечення необхідної якості поверхні. Проаналізовані параметри, що впливають на якість модифікованої поверхні, що є унікальними для процесу ЕІЛ. Це параметри електроду, підкладки, середовища та електричні характеристики. Зміна будь-який із цих параметрів призведе до зміни властивостей і якості модифікованої поверхні.
2. З метою усунення відшаровування під час технології нанесення покриття методом електроіскрового легування важливо враховувати кількість теплових процесів на поверхні виробу, які прямопропорційно залежать від потужності генератора. Відповідно проведений математичний аналіз впливу теплових процесів на формування покриття.
3. Оптимізація процесу нанесення зносостійкого покриття спирається на обмеження «знизу» - лінії рівних температур, та обмеженні «зверху» - товщині покриття.
4. Математичний аналіз показав, що для електродів різних діаметрів необхідно підібрати відповідний режим генератора.
5. Найоптимальніша швидкість анода 0,4 - 0,5 см/с за максимальної потужності генератора при найбільшій товщині покриття 20 мкм сприяє утворенню найбільш міцного покриття матеріалу при ЕІЛ.

Список використаних джерел:

1. Створення функціональних покриттів на поверхні маловуглецевої сталі багатостадійним електроіскровим легуванням хромом та графітом у насичувальних середовищах / Є. В. Івашенко, 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.
4. Shankar P., Jain V. K., Sundararajan T. Analysis of spark profiles during EDM process, *Machining Science and Technology*. 1997. 1:2. 195-217. DOI: 10.1080/10940349708945647
5. Ahn Y.C., Chung Y.S. Numerical analysis of the electro-discharge machining process for alumina-titanium carbide composite II. unsteady state approach. *Korean J. Chem. Eng.* 2002. 19. P. 694-702. <https://doi.org/10.1007/BF02699320>
6. Коротаєв Д.Н., Никитин Ю.Б., Иванова Е.В. Управление качеством формирования эксплуатационных параметров поверхностей при упрочнении электроискровым легированием. *Машиностроитель*. № 4. 2003. С. 65-69.
7. Johnson R.N., Sheldon G.L. Advances in the electrospark deposition coating process. *J Vac Sci Technol A*. 1986. 4(6). P. 2740-2746. <https://doi.org/10.1116/1.573672>
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.
10. Электроискровое легирование образцов с предварительно деформированным поверхностным флюом / Жура В.И., Юхненко В.В. и др. *Электронная обработка материалов*. 1978. № 2. С. 29-31.
11. Ozkan D., Kaleli H. Surface and Wear Analysis of Zinc Phosphate Coated Engine Oil Ring and Cylinder Liner Tested with Commercial Lubricant. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014. 6. doi:10.1155/2014/150968
12. Influence of Cryogenic Treatment on Microstructure and Properties Improvement of Die Steel / Shangtan Liu, Xiaochun Wu, Lei Shi, Yiwen Wu, Wei Qu. *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*. 2015. 3. P. 37- 46.
13. Vikas Chawla Corrosion Behavior of Nanostructured TiAlN and AlCrN Thin Coatings on ASTM-SA213-T-11 Boiler Steel in Simulated Salt Fog Conditions. *Materials Science and Metallurgy Engineering*. 2013. Vol. 1. No. 2. P. 31-36.
14. Проблеми безпечної експлуатації компресорного та насосного обладнання в сучасній промисловості : колективна монографія / В. С. Марцинковський та ін. ; за ред. В. Б. Тарельника, Є. В. Коноплянченка. Суми : ФОП Литовченко Є. Б., 2020. 410 с.
15. Schuh C.A., Nieh T.G., Yamasaki T. Hall-Petch breakdown manifested in abrasive wear resistance of nanocrystalline nickel. *Scripta Materialia*. 2002. Vol. 46 (10). P. 735 – 740.