

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛА В СТАЛЬНІЙ ДЕТАЛІ ПІД ЧАС ПОВЕРХНЕВОЇ МОДИФІКАЦІЇ МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯ

Гапонова О. П.¹, Жиленко Т.І.¹, Тарельник Н. В.², Жиленко О.І.¹

¹Сумський державний університет

²Сумський національний аграрний університет

***Анотація.** Запропонована математична модель, що 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 швидкістю переміщення легуючого електрода. Показано, що чим більший діаметр електрода, тим більша температура на межі покриття-основа, а отже краща адгезія покриття. Оптимальною швидкістю переміщення електрода є 0,5-1,5 м/с. 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, оператор Лапласа.*

Вступ

Якість поверхні значно впливає на експлуатаційні властивості деталей. Відомо, що 80-85 % машин виходить з експлуатації внаслідок зношування деталей, і лише 15-20 % - з інших причин [1]. Тому проблема зменшення зносу робочих поверхонь у вузлах тертя підвищення їх надійності та експлуатаційного ресурсу має особливе значення.

Руйнування та зношування деталей машин і механізмів починається, як правило, з поверхні, тому поліпшення її якості нерозривно пов'язане з вирішенням проблеми підвищення експлуатаційних характеристик їх роботи. Найбільш ефективно підвищення якості поверхні, відповідно й експлуатаційних властивостей деталей досягається технологічними методами. Поліпшення захисних та трибологічних властивостей поверхонь деталей можна досягти нанесенням спеціальних покриттів. Це наплавлення твердими та зносостійкими матеріалами [2], лазерна наплавка [3-5], хіміко-термічна обробка (ХТО) [6-7] та ін.

Одним із перспективних методів модифікації поверхні є електроіскрове легування (ЕІЛ). Метод ЕІЛ є одним з найбільш простих і доступних з технологічної точки зору.

В даний час накопичено великий практичний досвід з одержання за допомогою електроіскрового легування різних захисних та зносостійких покриттів [9-11]. Однак досі не було створено узагальненої теорії електроіскрового легування, за допомогою якої можна спрогнозувати властивості покриттів. Таким чином, проведення досліджень, спрямованих на створення спеціальних

покриттів методом ЕІЛ, що мають більш високі показники, і характеризують якість поверхні деталі, а також розробка математичної моделі, за допомогою якої можна спрогнозувати властивості покриттів є актуальним завданням.

Аналіз публікацій

Відомо [12], що високий адгезійний зв'язок покриттів, отриманих методом ЕІЛ, з основою пояснюється як інтенсивним перемішуванням матеріалів електродів у рідкій фазі, так і дифузією матеріалу анода в катод у твердій фазі. Підтвердженням проходження дифузійних процесів є наявність дифузійної зони між білим шаром і основою. Ця зона не нагрівається вище температури солідусу і не взаємодіє безпосередньо з навколишнім середовищем. Тому причиною її утворення може бути термічний вплив імпульсного розряду і дифузійне проникнення елементів анода і катода.

В літературі [13] процес формування покриття при ЕІЛ пов'язують з теплообміном між електродами. У роботах дослідників [14, 15] розглянуті деякі математичні моделі визначення температурного поля в поверхневому шарі катода в процесі ЕІЛ. Однак зазначені моделі не враховують ряд факторів і складні у реалізації.

Широко відомий напрямок технологічної теплофізики Рикаліна Н.М., заснований на теорії теплопровідності методу джерел теплоти [16]. Щодо теплопровідності твердих тіл найбільш універсальною функцією Гріна є розв'язок Кельвіна – фундаментальний розв'язок рівняння теплопровідності, що описує розподіл температури в необмеженому твердому тілі, що відбувається після виділення кінцевої кількості теплоти у вигляді миттєвого точкового джерела. Також було сформульовано основні положення теореми про розщеплення просторового процесу теплопровідності на ортогональні складові, що дозволило отримувати функцію Гріна для обмежених тіл із досить складними умовами теплообміну на граничних поверхнях [16]. Теорія розщеплення полягає в тому, що процес теплопровідності в тілі, що описується лінійним диференціальним рівнянням, розщеплюється на незалежні ортогональні складові за наступних умов:

- а) тіло сприймається як ортогональний перетин простіших тіл;
- б) диференціальний оператор є сумою незалежних операторів, що описують процеси в тілах перетину;
- в) крайові умови – незалежні умови для відповідних складових процесів;
- г) інтенсивність джерела теплоти виражається добутком ортогональних складових.

Після дотримання цих умов розв'язок диференціального рівняння може бути представлений добутком розв'язків рівнянь, що описують відповідні складові процесу [17].

Метою роботи є розробка математичної моделі визначення залежності температури від швидкості переміщення електроду при ЕІЛ у поверхневому

шарі оброблюваного матеріалу з метою оцінки міцності зв'язку між покриттям та основою.

Математична модель

Опишемо математичну модель процесу розповсюдження тепла у виробі за допомогою оператора Лапласа:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \Delta(T) \quad (1)$$

де T – температура точки на даний момент часу, x, y, z – координати точок $x \in R, y \in R, z \in R, t$ – час; α – коефіцієнт температуропровідності через незначне відхилення температури підкладки від температури плавлення.

За початок відліку вважатимемо температуру навколишнього середовища.

Граничні умови:

Умова руху джерела тепла (швидкість переміщення електроду при ЕІЛ) відносно поверхні підкладки

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_2 + q_3,$$

Температура верхньої межі

$$\theta = T_{mel} \quad (2)$$

$$q_2 = \frac{W}{S_e} \cdot K_2 \quad (3)$$

$$q_3 = L_{fe} \cdot m_e \quad (4)$$

$$K_2 = 1 - \frac{2}{p+1} \quad (5)$$

$$p = \sqrt{\frac{\Lambda_e C_e \rho_e}{\Lambda C P}} \quad (6)$$

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

Гранична умова першого роду.

$$\theta(x, y, z, \tau) = 0, \tau = 0.$$

Дані граничні умови дають можливість переходу від обмежених розмірів тіла до необмежених.

Рівняння миттєвого джерела тепла [18]:

$$\theta(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi\lambda R} e^{-R/2\omega} \quad (7)$$

λ, ω є коефіцієнтами температуропровідності та теплопровідності твердих тіл,

$$R = \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2 + (z_0 - z)^2} \quad (8)$$

x_0, y_0, z_0 – координати джерела.

Оскільки тепловиділення відбувається з джерела (електрода), яке має круглу форму, то необхідно враховувати його діаметр D та зміщення від початкового місця a .

Тоді рівняння (8) набуде вигляду

$$\theta = \frac{Q}{2\pi\lambda} \cdot F(v), \quad (9)$$

де v – швидкості руху джерела.

Отже рівняння (9) описує розповсюдження тепла в сталій деталі під час поверхневої обробки методом електроіскрового легування електродом циліндричної форми залежно від швидкості руху електрода. Це рівняння дає змогу оцінити характер розповсюдження тепла в покритті, що впливає на дифузійні процеси і, відповідно, на адгезію покриття. Розрахунки показали, що швидкість джерела майже не впливає на підвищення температури поверхні при значеннях близьких до 4 см/с. Тому для отримання найміцнішого покриття, необхідно, щоб швидкість джерела знаходилась у межах 0,5 - 1,5 см/с.

Висновки

1. Дана модель дає можливість визначити кількість теплових процесів на поверхні виробу для отримання міцного зчеплення покриття-основа під час ЕІЛ.

2. Представлене застосування теореми про розщеплення для опису математичної моделі.

3. Під час побудови математичної моделі було враховано, що температура поверхні зміцнюваної деталі залежить від теплофізичних характеристик анода та катода, діаметру електрода, а також від швидкістю переміщення легуючого електрода.

4. Показано, що чим більший діаметр електрода, тим більша температура на межі покриття-основа, а отже краща адгезія покриття.

5. На температуру межі покриття-основа також впливає швидкість швидкість переміщення електроду при ЕІЛ. Оптимальною є швидкість 0,5-1,5 м/с.

6. Для отримання найбільш міцного покриття необхідно використати електрод найбільшого діаметру у поєднанні із низькою швидкістю переміщення електроду при ЕІЛ.

Література

1. Проблемы и перспективы нанесения антифрикционных покрытий на вкладыши подшипников скольжения / В. С. Марцинковский, В. Б. Тарельник, А. В. Плякин. *Международная научно - техническая конференция ТЕРВИКОМ-20117 Международный форум "НАСОСЫ-2011"*. 2011. С.1-14.

2 Стороженко М. С., Уманский О. П., Тамаргазин О. А. Підвищення зносостійкості сталі 30ХГСА електроіскровим легуванням композитами на основі TiB₂-SiC. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2010. № 4 (71). С. 21–25.

3. Performance properties of electro-spark deposited carbide-ceramic coatings modified by laser beam / N. Radek, K. Bartkowiak. *Physics Procedia*. 2010. Vol. 5, Part A. P. 417-423.

4. Laser Texturing of Sliding Surfaces of Bearings and Pump Seals / B. Antoszewski, V. Tarellyk. *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 630. P. 301-307. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.630.301>.

5. Utilization of the UV laser with picosecond pulses for the formation of surface microstructures on elastomeric plastics / B. Antoszewski, S. Tofil, M. Scendo, W. Tarellyk. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (HERVICON+PUMPS-2017)*. 2017. Vol. 233. P. 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/233/1/012036>

6. Effects of Gas Nitriding on the Mechanical and Corrosion Properties of SACM 645 Steel / Shu-Hung Yeh, Liu-Ho Chiu, Heng Chang. *Engineering, Scientific Research Publishing*. 2011. Vol. 9(3). P. 942-948.

7. Ion and Gas Nitriding Applied to Steel Tool for Hot Work X38CrMoV5 Nitriding Type: Impact on the Wear Resistance / S. Ben Slima. *Materials Sciences and Applications, Scientific Research Publishing*. 2012. Vol. 9(3). P. 640– 644.

8. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarellyk, Cz. Kundera, O. V. Radionov, O. P. Gaponova. *Journal of Engineering Sciences*. 2018. Vol. 5, Issue 1. P. C 16–C 20. URL: [https://doi.org/10.21272/jes.2018.5\(1\).c4](https://doi.org/10.21272/jes.2018.5(1).c4).

9. Tarellyk V. B., Martsinkovskii V. S., Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse End Seals. Part 1. *Chemical Petroleum Engineering*. 2017. Vol. 53, Issue 1–2. P. 114–120. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0305-y>.

10. Tarelnik V. B., Martsinkovskii V. S., Zhukov A. N. Increase in the Reliability and Durability of Metal Impulse Seals. Part 2. *Chemical Petroleum Engineering*. 2017, July. Vol. 53, Issue 3–4. P. 266–272. URL: <https://doi.org/10.1007/s10556-017-0333-7>.
11. Ivanov V. I., Konevtsov L. A., Verkhoturov A. D. Effect of the physico-chemical properties of refractory compounds and hard alloys on their erosion in electric spark alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2019. T. 55, № 3. С. 241–250.
12. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревутский В. М. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Кишинев : Штинца, 1985. С. 145.
13. Моделирование температурного поля поверхности при электроискровом легировании металлов / В. Д. Власенко [и др.]. *Инженерные технологии и системы*. 2019. Т. 29, № 2. С. 218–233. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
14. Vlasenko V.D., Kolisova M.V. Modeling of the temperature field on the cathode's surface during electrophysical impact. *Contemporary Engineering Sciences*. 2016. 9(6). P. 249-256. DOI: <https://doi.org/10.12988/ces.2016.611>
15. Single spark analysis of electro-discharge deposition process / В. Muraidharan, Н. Chelladurai, Р. Singh, М. Kumar. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016. 31(14). P. 1853-1864. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1127936>
16. Рыкалин Н.Н. Об условии расщепления решений линейного параболического уравнения на ортогональные составляющие. *ДАН СССР*. 1959. Т. 125. № 3. С. 519-522.
17. Thermo-conduction equation fission method at thermophysic task solutions arising up at mechanical treatment / Ya.I. Baratz, L.R. Milovanova. *Вестник СГТУ*. 2010. № 1 (44). С. 28-34.
18. Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение. 1968. 290 с.