

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

УДК 621.9.048

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2022.98.0.63

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛА
В СТАЛЬНІЙ ДЕТАЛІ ПІД ЧАС ПОВЕРХНЕВОЇ МОДИФІКАЦІЇ
МЕТОДОМ ЕЛЕКТРОІСКРОВОГО ЛЕГУВАННЯГапонова О. П.¹, Жиленко Т. І.¹, Тарельник Н. В.², Жиленко О. І.¹¹Сумський державний університет²Сумський національний аграрний університет

Анотація. Запропоновано математичну модель, що дозволяє описати процес розповсюдження тепла у покритті під час електроіскрового легування металеві поверхні. Під час її побудови враховано, що температура поверхні зміцнюваної деталі залежить від теплофізичних характеристик анода та катода, діаметра 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. Оптимальною швидкістю переміщення електрода є 0,5-1,5 м/с. Для отримання найкращого зчеплення покриття з основою необхідно використати електрод найбільшого діаметра 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 і трибологічних властивостей поверхонь деталей можна досягти нанесенням спеціальних покриттів. Це наплавлення твердими та зносостійкими матеріалами [2], лазерне наплавлення [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. До основних особливостей ЕІЛ слід віднести такі [8]:

– локальність обробки поверхні – легування можна здійснювати в певно зазначених місцях від часток міліметра і більше, не захищаючи при цьому решту поверхні деталі;

– високу міцність зчеплення нанесеного матеріалу з основою;

– відсутність нагрівання деталі в процесі обробки;

– можливість використання в якості обраних матеріалів як чисті метали, так і сплави з різним ступенем легування, металокерамічні композиції, тугоплавкі сполуки і т.ін.;

– відсутність потреби у спеціальній попередній обробці поверхні.

Слід зазначити, що, незважаючи на різноманіття покриттів і технологій їх формування, основним завданням методів, що застосовуються, є підвищення якісних параметрів поверхневого шару. До параметрів, що характеризують якість поверхневого шару, відносять: геометричні розміри, фізико-механічні властивості, структуру [9].

У даний час накопичено великий практичний досвід з одержання за допомогою електроіскрового легування різних захисних та зносостійких покриттів [10-13]. Однак досі не було створено узагальненої теорії електроіскрового легування, за допомогою якої можна спрогнозувати властивості покриттів. Це відбувається через складність опису математичного процесу, в якому відображають-

ся параметри матеріалу катода та анода, склад газового середовища, частота, шпаруватість та амплітуда струмів іскрового розряду, амплітуда і частота вібрації електрода, поява вторинних фаз на катоді й аноді, величина міжелектродного проміжку і т.ін.

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 [14], 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.

Відомо, що на інтенсивність дифузійних процесів впливають швидкості процесів: дисоціації молекул насичувальної речовини з утворенням активних атомів (іонів), доставки активних атомів (іонів) до поверхні виробу, їх адсорбції на поверхні і, нарешті, дифузії активних атомів у твердому металі. Оскільки дифузія у твердій фазі є лімітуючою стадією процесу насичення, то більшість відомих спроб інтенсифікації процесу насичення зводяться до пошуку способів прискорення дифузії [15].

Дослідження дифузійних процесів при електроіскровому легуванні показали, що глибина проникнення елементів анода в катод, при масоперенесенні в твердій фазі, може становити від декількох до ста мікрометрів і більше, що неодноразово підтверджувалося металографічними і мікрорентгеноспектральними дослідженнями, а також методом радіоактивних ізотопів [16].

Характер взаємного розподілу елементів у поверхневих шарах, отриманих ЕІЛ, свідчить про високу рухливості атомів у кристалічній ґратці металів, підданих впливу іскрових розрядів. Висока рухливість атомів у кристалі-

чній ґратці металів, підданих впливу імпульсних розрядів, пов'язується з істотним внеском у перенесення речовини міжвузлових атомів, що генеруються в екстремальних умовах. Однією з причин високої рухливості атомів у твердій фазі може також бути локальна деформація кристалічної ґратки під впливом високих градієнтів температури й ударних хвиль, які можуть бути причиною перенесення елементів на значну глибину в твердій фазі.

У результаті ЕІЛ відбувається опромінення, нагрівання поверхневого шару тіла і його пластична деформація, що спотворюють ґратки за рахунок утворення точкових (вакантних вузлів і атомів проникнення), лінійних і поверхневих дефектів. У правильних бездефектних структурах атоми розташовуються в ґратці, утворюючи систему з мінімальною вільною енергією. Зсув атомів із рівноважного положення порушує порядок у ґратці. Для отримання таких порушень витрачається енергія, яка запасується в утворених дефектах. Величина повної енергії системи буде більшою за мінімальну, характерною для впорядкованої системи атомів, на величину збереженої енергії, яка визначається кількістю дефектів у ґратці, їх видом і є своєрідною мірою дефектності ґратки.

На перехід атома з вузла ґратки в сусідній або міжвузля потрібно затратити енергію, яку називають енергією активації процесу переходу атомів. У результаті одночасного переміщення в тілі великої кількості вакансій і утворення атомів проникнення відбувається зниження внутрішнього тертя полегшення дифузії в матеріалі. Таким чином, під час ЕІЛ відбувається взаємодія потоків частинок з речовиною (опромінення тіла). Наявність цієї взаємодії є необхідною умовою для передачі енергії з потоку тілу. Величина поглиненої енергії визначає ефективність ЕІЛ [17]. Якщо взаємодія, а отже, і поглинена енергія малі, то і зміна властивостей тіла, тобто технологічний ефект, буде також незначним.

Шар, сформований на катоді, за глибиною можна розділити на дві зони: зона, в якій відбувається перемішування рідких фаз матеріалів електродів («білий шар»), і зона, що лежить нижче зони перемішування, в якій елементи матеріалу анода переносяться в твердій фазі (дифузійна зона) [18]. Розподіл хімічних елементів електродів в кожній з цих зон визначається фізичними процесами, що відрізняються за своєю природою, але є залежними від кількості введеної в тіло енергії

– від енергії розряду. В літературі [19] процес формування покриття при ЕІЛ пов'язують з теплообміном між електродами. У роботах дослідників [20, 21] 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 Н.М. Рикаліна, оснований на теорії теплопровідності методу джерел теплоти [18]. Щодо теплопровідності твердих тіл найбільш універсальною функцією Гріна є розв'язок Кельвіна – фундаментальний розв'язок рівняння теплопровідності, який 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 [18]. Теорія розщеплення полягає в тому, що процес теплопровідності в тілі, що описується лінійним диференціальним рівнянням, розщеплюється на незалежні ортогональні складові за таких 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 процеси [22].

Мета та постановка завдання

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

$$\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_2 + q_3. \quad (2)$$

Температура верхньої межі

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

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

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

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

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

Гранична умова першого роду.

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

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

Рівняння миттєвого джерела тепла [23]:

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

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.

Рівняння (7) може бути розв'язане за допомогою теореми про розщеплення, оскільки:

а) однорідне ізотропне тверде тіло можна подати перетином необмежених тіл за трьома просторовими координатами;

б) диференціальний оператор у рівнянні (7) розпадається на три лінійні оператори;

в) початкові та граничні умови тут розпадаються на незалежні умови;

г) потужність миттєвого точкового джерела у вигляді добутку δ -функцій Дірака визначається лінійними процесами теплопровідності в необмеженому тілі з миттєвими плоскими джерелами одиничної потужності.

Відповідно до теореми про розщеплення температуру в необмеженому ізотропному тілі з миттєвим точковим джерелом, що діє в точці $x = y = z = 0$, отримаємо як добуток співвідношень (2)

$$\theta(x, y, z) = \frac{Q}{4\pi\lambda\sqrt{(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2 + (z_0-z)^2}} \cdot e^{-\sqrt{(x_0-x)^2 + (y_0-y)^2 + (z_0-z)^2}/2\omega} \quad (9)$$

З метою одержання покриття з міцним з'єднанням матеріалу катода і анода (виробом) необхідно, щоб температура поверхні катода і температура плавлення були співрозмірними.

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

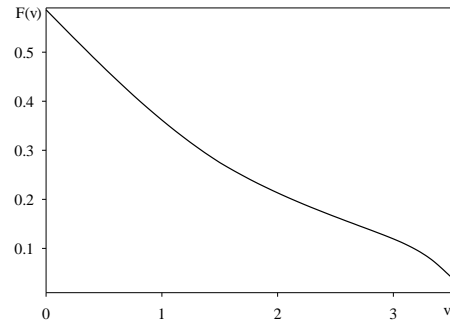
Тоді рівняння (9) набуде вигляду

$$\theta = \frac{Q}{2\pi\lambda} \cdot F(v), \quad (10)$$

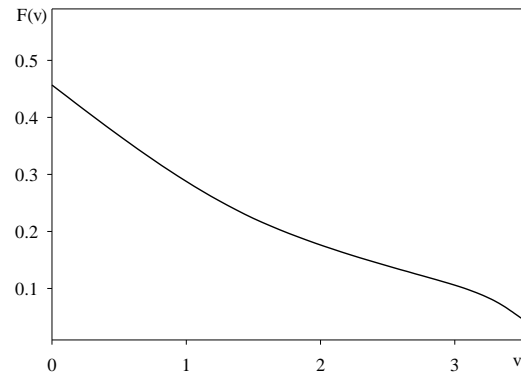
де v – швидкості руху джерела.

Оскільки температура поверхні нанесення покриття залежить від швидкості руху джерела (електрода), то наочне бачення цього відкриває можливість керування процесом ЕІЛ.

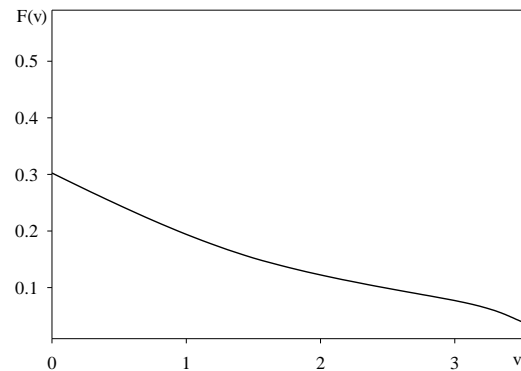
Отже, поблизу початкової швидкості джерела і її незначного підвищення спостерігається найбільша температура з'єднання катода та анода.



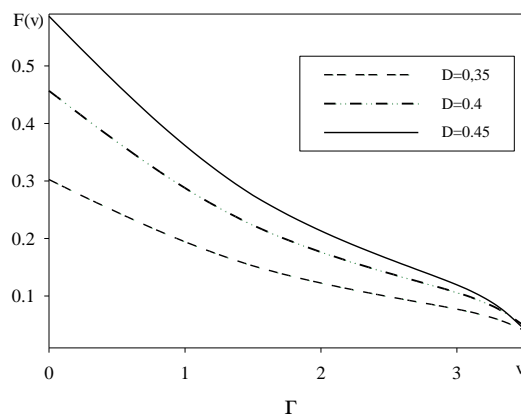
а



б



в



г

Рис. 1. Залежність температури від швидкості руху джерела: а – $D = 0,45$; б – $D = 0,4$; в – $D = 0,35$; г – загальна картина залежності $F(v)$

Також важливо відзначити, 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, діаметра електрода, а також від швидкості 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 переміщення електрода при ЕІЛ. Оптимальною є швидкість 0,5 – 1,5 м/с.

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

Література

1. Марцинковский В.С., Тарельник В.Б., Плякин А.В. Проблемы и перспективы нанесения антифрикционных покрытий на вкладыши подшипников скольжения. *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 композиціями 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. Tarelnyk. *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. Tarelnik. *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. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling – Shaft press joints against fretting wear / V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, Ye. Konoplianchenko, O. Gaponova, M. Dumanchuk. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2020. P. 216–225. DOI 10.1007/978-3-030-22365-6_22
9. Analysis of the quality of sulfomolybdenum coatings obtained by electrospark alloying methods / B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk et al. *Materials*. 2021. 14. 739. <https://doi.org/10.3390/ma14216332>
10. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, 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).
11. Tarelnik 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>.
12. 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>.
13. Ivanov V. I., Konevtsov L. A., Verkhoturov A. D. Effect of the physicochemical 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.
14. Гитлевич А. Е., Михайлов В. В., Парканский Н. Я., Ревутский В. М. Электроспоровое легирование металлических поверхностей. КИШИНЕВ: ШТИНЦА, 1985. С. 145.

15. Способ повышения интенсификации физико-химических процессов в текучих средах : пат. 2341734 Российская Федерация, МПК F24J 3/00 (2006.01) / Бритвин Л. Н., Аванесян В. П.; патентообладатель ООО «Научно-производственная фирма ТГМ». № 2006141661/06 ; заявл. 27.11.06 ; опубл. 20.12.08, Бюл. № 35. 5 с
 16. Тарельник В. Б. Управление качеством поверхностных слоев деталей комбинированным электроэрозионным легированием. Сумы: Изд-во «МакДен», 2002. 323 с.
 17. Николенко С.В., Верхотуров А.Д., Сюй Н.А. Аспекты повышения эффективности процесса электроискрового легирования. *Вестник инженерной школы ДВФУ*. 2014. № 1 (18). С. 67-78.
 18. Рыкалин Н.Н. Об условии расщепления решений линейного параболического уравнения на ортогональные составляющие. *ДАН СССР*. 1959. Т. 125. № 3. С. 519-522.
 19. 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>
 20. 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>
 21. Single spark analysis of electro-discharge deposition process / В. Muralidharan, 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>
 22. 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.
 23. Резников А.Н. Теплофизика резания. М.: Машиностроение. 1968. 290 с.
- References**
1. Problemy i perspektivy naneseniya antifriktsionnykh pokrytiy na vkladyshe podshipnikov skol'zheniya / V. S. Martsinkovskiy, V. B. Tarelnik, A. V. Plyakin. *Mezhdunarodnaya nauchno - tekhnicheskaya konferentsiya TERVIKOM-20117 Mezhdunarodnyy forum "NASOSY-2011"*. 2011. S.1-14.
 2. Storozhenko M. S., Umansky O. P., Tamarhazyn O. A. Pidvyshchennya znosostiykosti stali 30KHSA elektroiskrovym lehuvannyam kompozy-tamy na osnovi TiB₂-SiC. *Avyatsyonno-kosmicheskaya tekhnika y tekhnolohyya*. 2010. № 4 (71). S. 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. Tarelnyk. *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. Tarelnik. *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. Technology support for protecting contacting surfaces of half-coupling – Shaft press joints against fretting wear / V. Martsynkovskyy, V. Tarelnyk, Ye. Konoplianchenko, O. Gaponova, M. Dumanchuk. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, 2020. P. 216–225. DOI 10.1007/978-3-030-22365-6_22
 9. Analysis of the quality of sulfomolybdenum coatings obtained by electrospark alloying methods / B. Antoszewski, O. P. Gaponova, V. B. Tarelnyk et al. *Materials*. 2021. 14. 739. <https://doi.org/10.3390/ma14216332>
 10. Ecologically Safe Process for Sulfo-Aluminizing Steel Parts / L. D. Plyatsuk, V. B. Tarelnyk, 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).
 11. Tarelnik 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>.
 12. 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>.
 13. Ivanov V. I., Konevtsov L. A., Verkhotur A. D. Effect of the physicochemical properties of refractory compounds and hard alloys on their ero-

- sion in electric spark alloying. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2019. T. 55, № 3. С. 241–250.
14. Gitlevich A. Ye., Mikhaylov V. V., Parkanskiy N. YA., Revutskiy V. M. Elektroiskrovoye legirovaniye metallicheskih poverkhnostey. Kishinev : Shtintsa, 1985. S. 145.
15. Sposob povysheniya intensivatsii fiziko-khimicheskikh protsessov v tekuchikh sredakh : pat. 2341734 RF, МПК F24J 3/00 (2006.01) / Britvin L. N., Avanesyan V. P. ; patentoobladatel' ООО «Nauchno-proizvodstvennaya firma TGM». № 2006141661/06 ; zayavl. 27.11.06 ; opubl. 20.12.08, Byul. № 35. S. 5 s
16. Tarelnyk V. B. Upravleniye kachestvom poverkh-nostnykh slojev detaley kombinirovannym elek-troerozionnym legirovaniyem. Sumy : Izd-vo «MakDen», 2002. 323 s.
17. Aspekty povysheniya effektivnosti protsessa elektroiskrovogo legirovaniya / S.V. Nikolenko, A.D. Verkhoturov, N.A. Syuy. Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU. 2014. № 1 (18). S. 67-78.
18. Rykalin N.N. Ob uslovii rasshchepeniya resheniy lineynogo parabolicheskogo uravneniya na ortogonal'nyye sostavlyayushchiye. DAN SSSR. 1959. T. 125. № 3. S. 519-522.
19. Modelirovaniye temperaturnogo polya poverkhnosti pri elektroiskrovom legirovanii metallov / V. D. Vlasenko [i dr.]. Inzhenernyye tekhnologii i sistemy. 2019. T. 29, № 2. S. 218–233. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.029.201902.218-233>
20. 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>
21. Single spark analysis of electro-discharge deposition process / B.Muralidharan, H. Chelladurai, P. Singh, M. Kumar. *Materials and Manufacturing Processes*. 2016. 31(14). P. 1853-1864. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1127936>
22. 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.
23. Reznikov A.N. Teplofizika rezaniya. M.: Mashinostroeniye. 1968. 290 s.

Гапонова Оксана Петрівна, д.т.н., доц., кафедра прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, тел. +38 0542-64-09-49, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Жиленко Тетяна Іванівна, к.ф.-м.н., доц., кафедра математичного аналізу і методів оптимізації, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, тел. +38 0542-64-09-49,

t.zhylenko@phe.sumdu.edu.ua

Тарельник Наталія В'ячеславівна, к.е.н., доцент, кафедра проектування технічних систем, Сумський національний аграрний університет, вул. Герасима Кондратьєва, 160, м. Суми, 40000, телефон +38

natasha-tarelnik@ukr.net

Жиленко Олександр Іванович, магістрант, кафедра прикладного матеріалознавства та технології конструкційних матеріалів, Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, 40007, телефон +38 0542-64-09-49, Stz89@i.ua

Mathematical model of the heat distribution process in a steel part during surface modification by the electro-spark alloying method

Abstract. Problem. Electro-spark alloying (ESA) is a promising process of surface modification, which allows obtaining a high-quality coating, is environmentally safe and energy efficient. Wide application in production is hindered by the need to develop the technology, as well as the lack of a mathematical model for predicting the properties of coatings depending on materials and processing modes. It is known that the high adhesive bond of the coatings obtained by the ESA method with the base is explained both by the intensive mixing of the electrode materials in the liquid phase and by the diffusion of the anode material into the cathode in the solid phase. **Goal** is to develop the mathematical model that allows describing the process of heat propagation in the coating during electro-spark alloying of the metal surface. **Methodology.** The direction of technological thermal physics of N.M. Rykalin is widely known, it is based on the theory of thermal conductivity of the method of heat sources. Regarding the thermal conductivity of solid bodies, the most universal Green's function is the Kelvin solution - the fundamental solution of the heat conduction equation, which describes the temperature distribution in an unbounded solid body, which occurs after the release of a finite amount of heat in the form of an instantaneous point source. The mathematical model of the process of heat propagation in the product during ESA was described using the Laplace operator. It is taken into account that the temperature of the surface of the strengthened part depends on the thermophysical characteristics of the anode and cathode, the diameter of the electrode, as well as the speed of movement of the alloying electrode. **Results.** The original mathematical model that allows describing the process of heat propagation in the coating during electro-spark alloying of the metal surface is developed. It is shown that the larger the diameter of the electrode, the higher the temperature at the coating-base interface, and therefore the better the adhesion

of the coating. The optimal speed of moving the electrode is 0.5-1.5 m/s. **Practical value.** To obtain the best adhesion of the coating to the base, it is necessary to use an electrode with the largest diameter of 4.5 mm in combination with a low speed of moving the electrode.

Key words: electro-spark alloying, thermal conductivity, cathode, anode, adhesion, Laplace operator.

Oksana Gaponova, D.Sc, Associate Professor, Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials, Sumy State University, Rymkogo-Korsakova st. 2, Sumy, 40007, phone +38 0542-64-09-49, gaponova@pmtkm.sumdu.edu.ua

Tetyana Zhylenko, Ph.D., Associate Professor, Department of Mathematical Analysis and Optimization Methods, Sumy State University, Rymkogo-Korsakova st. 2, Sumy, 40007, phone +38 0542-64-09-49, t.zhylenko@phe.sumdu.edu.ua

Nataliia Tarelnyk, Ph.D., Associate Professor, Department of Engineering Systems Design, Sumy National Agrarian University, Herasyrna Kondratieva st. 160, Sumy, 40000, phone +38 (0542) 70-10-12, nata-sha-tarelnik@ukr.net

Oleksandr Zhylenko, graduate student, Department of Applied Material Science and Technology of Constructional Materials, Sumy State University, Rymkogo-Korsakova st. 2, Sumy, 40007, phone +38 0542-64-09-49, Stz89@i.ua.
