

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ПРИ ФРИКЦІЙНО-ЕЛЕКТРИЧНОМУ МОДИФІКУВАННІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

Тулупов В. І., Онищук С. Г.

В работе представлены разработанные математические модели тепловых полей, возникающих при фрикционно-электрической модифицировании деталей в зависимости от параметров импульсного тока и режимов выглаживания. Приведены математические зависимости для определения частоты импульсного тока, длины упрочненных фрагментов, величины продольной подачи индентора для получения регулярной дискретной структуры с использованием в качестве модификатора дисульфида молибдена. Разработана математическая модель теплового потока и исследована связь между режимами и температурой. Определена глубина упрочненного слоя после фрикционно-электрического модифицирования поверхностей деталей.

У роботі представлено розроблені математичні моделі теплових полів, що виникають при фрикційно-електричному модифікуванні деталей в залежності від параметрів імпульсного струму та режимів вигладжування. Наведено математичні залежності для визначення частоти імпульсного струму, довжини зміцнених фрагментів, величини поздовжньої подачі індентора для отримання регулярної дискретної структури з використанням в якості модифікатора дисульфиду молібдену. Визначено математичну модель теплового потоку та досліджено зв'язок між режимами та температурою. Визначено глибину зміцненого шару після фрикційно-електричного модифікування поверхонь деталей.

The paper presents the developed mathematical models of thermal fields that arise during friction-electric modification of parts depending on the parameters of the pulsed current and the modes of smoothing. The mathematical dependences for determining the pulse current frequency, the length of the strengthened fragments, and the magnitude of the longitudinal feed of the indenter are obtained for obtaining a regular discrete structure using molybdenum disulfide as a modifier. The mathematical model of the heat flow is determined and the relationship between modes and temperature is investigated. The depth of the hardened layer after the friction-electric modification of the surfaces of the parts is determined.

Тулупов В. І.

канд. техн. наук, доц. каф. ТМ ДДМА  
tiup@dgma.donetsk.ua

Онищук С. Г.

канд. техн. наук, доц. каф. ТМ ДДМА

ДДМА – Донбаська державна машинобудівна академія, м. Краматорськ.

УДК 621.891

Тулупов В. І., Онищук С. Г.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛОВИХ ПОЛІВ ПРИ ФРИКЦІЙНО-ЕЛЕКТРИЧНОМУ МОДИФІКУВАННІ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ

Однією з актуальних проблем сучасного машинобудування є розробка заходів із підвищення довговічності машин в жорстких умовах експлуатації. Довговічність машин та її складових в основному лімітується недостатньою зносостійкістю поверхонь деталей трибо-систем. Досвід експлуатації машин показав, що їх довговічність та надійність у значній мірі залежать від стану і фізико-механічних властивостей тонких поверхневих шарів вузлів тертя, де зароджуються і розвиваються різноманітні процеси зношування. У зв'язку з цим важливого значення набуває розвиток методів модифікації (зміцнення) поверхонь тертя.

Найбільшу ефективність при цьому показали комбіновані технології інженерії поверхні. Дискретне зміцнення поверхневого шару є однією з таких прогресивних комбінованих технологій, що дозволяє не тільки варіювати в широких межах міцнісні та зносостійкі властивості поверхневого шару, але й створює сприятливі умови для керування його напружено-деформованим станом на відміну від суцільно зміцнених структур.

Останнім часом сформувався новий науковий напрямок, а саме інженерія поверхні деталей машин [1]. Саме якість поверхневого шару визначає експлуатаційні властивості виробу та тривалість його життєвого циклу. В машинобудуванні використовується багато методів зміцнення поверхні деталей. Останнім часом набувають поширення комбіновані методи, основані на використанні фізико-хімічних ефектів у поєднанні з механічними методами. Одним зі способів зміцнення сталевих деталей є механічна обробка поверхонь вигладжуванням при пропусканні електричного змінного струму через зону контакту інструмента з деталлю. В результаті утворюється дискретна структура поверхні у вигляді зміцнених фрагментів [2].

В. Р. Едігаровим [3] розроблений спосіб комбінованого фрикційно-електричного модифікування сталевих деталей. Відповідно з цим способом на поверхню деталі наноситься дисперсний модифікатор з поверхнево-активною речовиною з наступною механічною обробкою поверхонь згладжуванням. При цьому пропускається змінний електричний струм через зону контакту інструмента з деталлю.

Потребує вивчення технологія здійснення фрикційно-електричного модифікування з додаванням в якості модифікатора дисульфиду молібдену, а саме режими здійснення процесу з мінімумом витрат.

Мета роботи – дослідити процес утворення дискретної поверхні з нанесенням модифікатора з наступною механічною обробкою згладжуванням при пропусканні імпульсного електричного струму прямокутної форми через зону контакту інструмента з деталлю.

Дослідження здійснювались в лабораторії кафедри технології машинобудування з використанням токарно-гвинторізного верстата мод. 1К625 та генератора імпульсного струму [4]. Основні характеристики генератора імпульсного струму: номінальна електрична потужність – 2 кВт, максимальний робочий струм – 300 А, максимальна робоча напруга – 10 В, частота імпульсного струму – 20...8000 Гц, шпаруватість – 20...80 %, напруга живлення – 220 В, рід вихідного (робочого) струму – прямокутної форми.

На поверхню деталі наноситься модифікатор, а саме дисульфід молібдену ( $\text{MoS}_2$ ). Для дисульфиду молібдену притаманна чітко виражена шарувата структура з можливістю легкого ковзання шарів один відносно іншого. Зв'язок між шарами достатньо слабкий та опір

на зсув по площині розділу незначний. Цим обумовлений низький коефіцієнт тертя, що зберігається низьким навіть при значному нагріванні та високих навантаженнях [5].

Особливістю запропонованого способу зміцнення є наступне. Оброблювана заготовка, що виконана зі сталі 40ХН і має діаметр 50 мм, установлюється на токарно-гвинторізному верстаті та отримує обертальний рух. Частота обертання становить  $63 \text{ хв}^{-1}$ . Вигладжувач виконаний з твердого сплаву марки Т15К6, який закріплюється у спеціальному пристрої.

Теплові процеси, що виникають при ФЕМ, зв'язані з виділенням теплової енергії внаслідок проходження електричного струму, тертя інструменту по оброблюваній деталі, деформуванням металу поверхневого шару, теплообміном між інструментом та оброблюваною поверхнею, теплопередачею у зовнішнє середовище. Найбільший вплив чинить теплота, що обумовлена тертям інструмента по оброблюваній поверхні, та теплота, що виділяється при проходженні струму через зону контакту виробу та інструмента.

Ці два теплових потоки створюють в матеріалі мікрооб'єми з підвищеною температурою, яка суттєво впливає на пружно-пластичні властивості матеріалу, та мікрооб'єми, температура нагрівання яких перевищує температуру фазових перетворень сталі.

Для постановки задачі під час дослідження теплових полів, що виникають у процесі обробки ФЕМ, необхідно визначити умови протікання процесу та провести його схематизацію (рис. 1).

У прийнятій системі координат з початком у точці  $O$ , відповідній початковій межі контакту різця з деталлю, вісь  $X$  розташовується на поверхні деталі вздовж руху джерела тепла, вісь  $Y$  – по нормалі до поверхні вглиб деталі. На схемі формування теплових потоків:  $\tau_i \cdot v$  – довжина, на якій діє тепловий потік, що виникає від пружно-пластичного деформування процесу вигладжування спільно з джоулевим теплом при проходженні імпульсу струму через зону контакту «інструмент – деталь»;  $T_i \cdot v$  – довжина, яку проходить різець за час періоду повторення імпульсів;  $l$  – ширина джерела теплоти при точінні, що визначається шириною контактної поверхні індентора ( $\tau_i$  – тривалість імпульсу струму;  $T_i$  – період повторення імпульсів струму;  $v$  – швидкість оброблення).

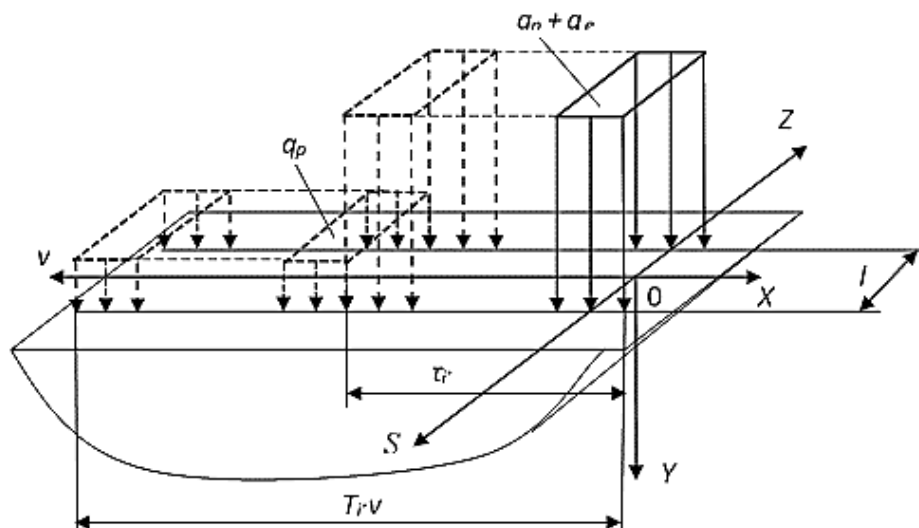


Рис. 1. Схема формування теплових потоків у процесі ФЕМ

Оскільки величина площі контакту інструменту з оброблюваною поверхнею істотно менше за розміри самої деталі, то остання розглядається як напівбезмежне тіло.

Найбільш інтенсивне тепловиділення відбувається у зоні контакту індентора з деталлю у момент проходження імпульсу струму, оскільки швидкість обертання деталі порівняно велика та час контакту з дільницею деталі дуже малий, то вирівнюванням температури можна нехтувати.

Припустимо, що індентор і деталь у зоні контакту мають однакову температуру. Джерелом теплоти приймаємо інструмент, а як зону концентрації теплоти – поверхню його контакту з поверхнею оброблюваної деталі. У процесі зміцнення індентор має електричний контакт з деталлю по деякому майданчику величиною  $A_k$ . Кожна точка поверхні  $A_k$ , рухаючись з швидкістю  $v$ , піддається дії з боку плоского джерела теплоти протягом часу:

$$\tau = \frac{h}{v},$$

де  $h$  – висота контактного майданчика.

Дію обмеженого плоского джерела теплоти уподібнимо дії безмежно великого плоского джерела, а час його дії приймемо таким, що дорівнює  $\tau$ . У цьому випадку температурне поле в деталі, що приймається за напівбезмежне тіло, буде одновимірним і диференціальне рівняння теплопровідності запишеться у такому вигляді:

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2},$$

за початкових і граничних умов:

$$\Theta_{(y,\tau)} \Big|_{y=0} = \Theta_c; \quad \Theta_{(y,\tau)} \Big|_{y=0} = \Theta_0; \quad \frac{\partial \Theta_{(y,\tau)}}{\partial y} \Big|_{y=\infty} = 0,$$

де  $\Theta_c$  – початкова температура деталі, яка дорівнює температурі навколишнього середовища;

$\Theta_0$  – температура джерела теплової енергії.

В умовах миттєвої дії плоского джерела теплоти на поверхню напівбезмежного тіла розв'язання рівняння має вигляд:

$$\Theta = 2q_s \sqrt{\frac{\tau}{c\rho\lambda}} \operatorname{ierfc} \left( \frac{y}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \Theta_c, \quad (1)$$

де  $q_s$  – сумарна інтенсивність тепловиділення на одиничному майданчику;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності;

$a$  – коефіцієнт температуропровідності;

$\tau$  – час дії джерела теплоти на одиничний майданчик контакту;

$y$  – координата точки у глибину деталі;

$\rho$  – густина матеріалу деталі;

$c$  – теплоємність матеріалу деталі;

$\Theta_c$  – температура середовища;

$\operatorname{ierfc}(u) = \int_u^{\infty} [1 - \operatorname{erf}(u)] du$  – інтеграл доповнення функції помилок.

Потужність джерела теплоти процесу ППД визначається швидкістю його переміщення  $v$  і силою  $P$ , що діє у напрямі переміщення в зоні обробки і дорівнює:

$$Wm = P \cdot v.$$

У момент проходження імпульсу струму тривалістю  $\tau_i$ , ця потужність складається з потужністю імпульсу струму:

$$We = U \cdot I \cdot \eta.,$$

де  $U$  – величина напруги, що подається, з генератора імпульсного струму на індентор і деталь;

$I$  – амплітуда імпульсу струму;

$\eta$  – коефіцієнт, що враховує втрати в електричному ланцюзі.

Густина теплового потоку, рівномірно розподіленого по площі електричного контакту інструменту з деталлю у момент паузи між імпульсами струму:

$$q_p = \frac{b_p P_y v}{A_k},$$

де  $A_k$  – площа електричного контакту інструменту з деталлю;

$P_y$  – сила притискання індентора за віссю  $y$ ;

$b_p$  – частина теплоти, що поступає в деталь, яка пов'язана з процесом деформування.

У момент проходження імпульсу струму через контактний майданчик інструменту з деталлю, в елементарному об'ємі  $dV = dS \cdot dx$  за законом Джоуля – Ленца за час  $\tau$  виділяється тепло, яке дорівнює:

$$dQ = j^2 \cdot \gamma \cdot dS \cdot dx \cdot \tau,$$

де  $j$  – щільність імпульсу струму;

$\gamma$  – питомий електричний опір матеріалу заготовки.

Густина теплового потоку, створюваного імпульсом струму:

$$q_e = \frac{b_e \cdot I \cdot U \cdot \eta}{A_k},$$

де  $b_e$  – частина теплоти, що поступає в деталь при пропусканні електричного струму через контактний майданчик «інструмент – деталь».

Таким чином, у процесі вигладжування загальна густина теплового потоку у момент проходження імпульсу струму через контактний майданчик «інструмент – деталь» буде дорівнювати сумі  $q_p$  і  $q_e$ :

$$q_s = q_p + q_e = \frac{b_p P_y v + b_e I U \eta}{A_k}. \quad (2)$$

Підставимо у (1) замість  $q_s$  вираз (2):

$$\Theta(y, \tau) = 2 \cdot \frac{b_p P_y v + b_e I U \eta}{A_k} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c \rho \lambda}} \operatorname{ierfc} \left( \frac{y}{2\sqrt{a\tau}} \right) + \Theta_c. \quad (3)$$

Використовуючи залежність (3), була отримана графічна модель теплового поля (рис. 2), що виникає у процесі ФЕМ.

За побудованою залежністю температури від глибини, шару на стадії нагріву (рис. 3) при досягненні часу  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с визначимо глибину шару, на якій буде відбуватися фазове перетворення у поверхневому шарі деталі зі сталі 40ХН (при швидкості вигладжування  $v = 60$  м/хв,  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с, подачі  $S = 0,2$  мм/об.). При густині струму  $j = 0,35 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup> глибина зміцнення  $h = 0,0875$  мм, а при густині струму  $j = 1 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>  $h = 0,15$  мм.

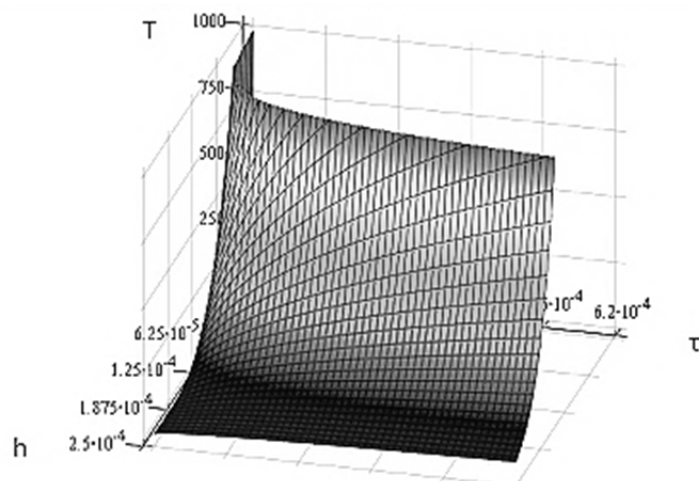


Рис. 2. Зміна температури нагріву поверхневого шару металу в зоні одиничного контакту інструмента й деталі (сталь 40ХН, швидкість вигладжування  $v = 60$  м/хв,  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с, подача  $S = 0,5$  мм/об), густина струму  $j = 1 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>

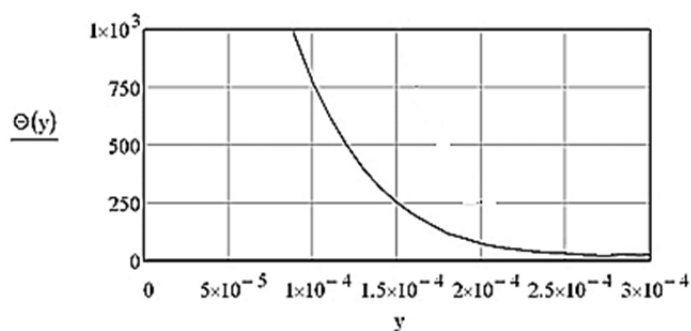


Рис. 3. Залежність температури від глибини шару на стадії нагріву при  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с та густині струму  $j = 0,35 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>

## ВИСНОВКИ

Отримані теоретичні розрахунки розподілу температури нагріву у глибину поверхневого шару дозволяють визначити товщину зміцненого шару при різних режимах оброблення. Розроблена математична модель розподілу температури дає можливість оптимізувати режими ФЕМ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Инженерия поверхности деталей / под ред. А. Г. Сулова. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.*
2. *Багмутов В. П. Импульсное электромеханическое упрочнение стальных изделий с образованием регулярной дискретной структуры поверхностного слоя / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев // Вестник машиностроения. – 1996. – № 2. – С. 38.*
3. *Эдигаров В. Р. Влияние режимов поверхностного фрикционно-электрического модифицирования на структуру, механические и эксплуатационные свойства стали осей балансиров: автореф. дис ... канд. техн. наук : спец. 05.02.01 «Материаловедение (машиностроение)» / В.Р. Эдигаров. – Тюмень, 2006. – 20 с.*
4. *Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монографія / С. В. Ковалевський, В. І. Тулунов. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 100 с.*
5. *Прудников М. И. Антифрикционные твердосмазочные покрытия – современная альтернатива резьбовым пастам для сборки обсадных труб / М. И. Прудников // Сфера. Нефть и газ. – 2016. – № 5 (55). – С. 30–32.*

Стаття надійшла до редакції 11.10.2017 р.