

УДК 621.787.001.57

Тулупов В. І.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОМУ ЗМІЦНЮВАЛЬНОМУ ТОЧІННІ

Основним напрямком теоретичних та експериментальних досліджень імпульсних методів поверхневого зміцнення деталей машин є вивчення їх технологічних можливостей та вплив технологічних параметрів на якість поверхневого шару робочих поверхонь деталей що обробляються.

Більшість імпульсних технологічних методів поверхневого зміцнення деталей машин [1, 2] характеризуються локальністю дії енергетичного потоку високої інтенсивності на поверхневий шар деталі з одночасним деформуванням, яка супроводжується швидкоплинними термодинамічними процесами.

Відомо [2], що кінетичні і термодинамічні умови обробки металу роблять вирішальний вплив на структурні зміни і фазові переходи, формуючи при цьому фізико-механічний стан поверхневого шару деталі.

Для технологічного забезпечення заданої твердості, структури і фазового складу, глибини зміцнення виникає актуальна проблема оцінки динаміки температурних і деформаційних полів. Але у зв'язку з високою локальністю дії і великою швидкістю протікання процесу його експериментальне вивчення викликає деякі труднощі і тому виникає необхідність моделювання напружено-деформованого стану металу в зоні контакту інструмент-деталь.

Сучасні методи зміцнення поверхневого шару деталей машин в більшості своїй, ґрунтуються на застосуванні концентрованих потоків енергії (КПЕ), дія яких направлена на отримання структур тих, що мають високу твердість і міцність. До таких методів відноситься і електроімпульсне зміцнювальне точіння (ЕІЗТ) [3, 4].

ЕІЗТ – спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей, що включає механічну обробку чистовим точінням з одночасним пропусканням імпульсного струму прямокутної форми через зону контакту різального інструменту з деталлю, що сприяє утворенню регулярної дискретної структури (РДС) поверхні у вигляді зміцнених фрагментів.

Розподілення по поверхні, яка оброблюється, зміцнених фрагментів, що утворюють РДС, визначається частотою і тривалістю імпульсів струму, а також режимами механічної обробки (повздовжньою подачею і частотою обертання шпинделя). Твердість фрагментів залежатиме від температурно-часового режиму, марки матеріалу що обробляється та його початкового стану.

Метою роботи є дослідження теплових полів тих, що виникають у процесі обробки методом ЕІЗТ, для керування якістю поверхні деталі, що обробляється, використовуючи при цьому аналітичні методи розрахунку.

Джерелами теплоти у процесі обробки ЕІЗТ є внутрішнє тертя пружно-пластичної деформації поверхневого шару деталі, тертя задньої поверхні різця з деталлю і передньої зі стружкою і Джоулево тепло, що виділяється при проходженні імпульсу струму через контакт інструмент-деталь [5, 6]. Тепло, що виділяється цими джерелами йде на нагрів деталі і інструменту, а також в навколишнє середовище.

Для постановки завдання по дослідженню теплових полів при ЕІЗТ необхідно визначити умови протікання процесу і провести його схематизацію (рис. 1). У прийнятій системі координат з початком в точці  $O$ , відповідній початковій межі контакту різця з деталлю, вісь  $X$  розташовується на поверхні деталі, вісь  $Y$  – по нормалі до поверхні углиб деталі. На схемі формування теплових потоків:  $\tau_i$  – тривалість імпульсу струму і  $T$  – період повторення імпульсів.

Оскільки величина площі контакту інструменту з оброблюваною поверхнею істотно менше за розміри самої деталі, то остання розглядається як напівнескінченне тіло. Джерело теплоти, що виникає на поверхні заготовки в результаті взаємодії з інструментом, розглядається як рухомий смуговий, шириною  $l$ , визначуваною умовами контакту інструменту з деталлю, з рівномірним розподілом густини теплового потоку, за часом функціонування джерело діє періодично (потужність потоку міняється в часі тому як струм, що застосовується – імпульсний, прямокутної форми).

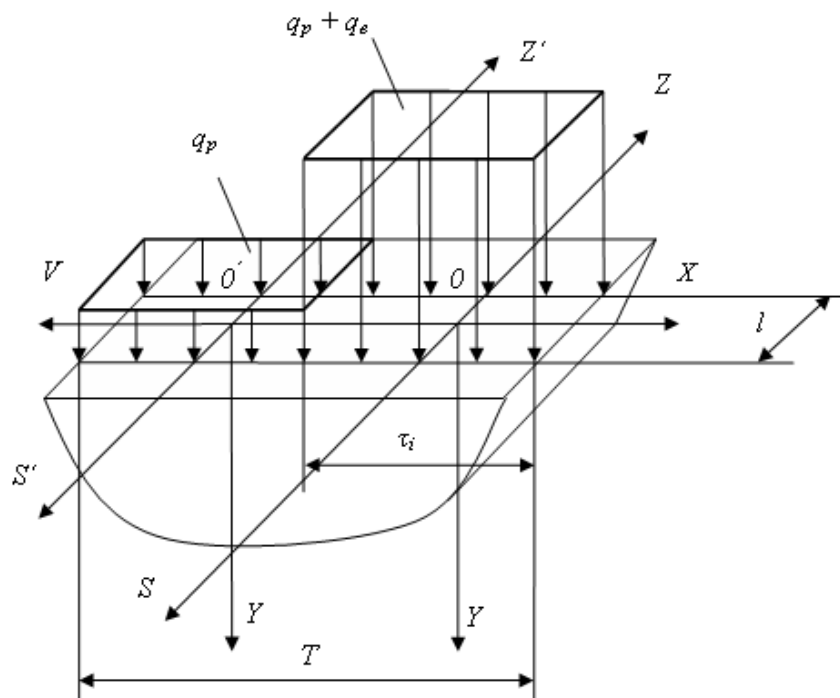


Рис. 1. Схема формування теплових потоків в процесі ЕІЗТ

Потужність джерела теплоти процесу різання, визначається швидкістю його переміщення  $v$  і силою  $P$ , що діє у напрямі переміщення в зоні обробки і дорівнюється  $W_m = Pv$ , а у момент проходження імпульсу струму тривалістю  $\tau_i$ , ця потужність підсумовується з потужністю імпульсу струму  $W_e = U \cdot I \cdot \eta_y$ .

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

$$q_p = \frac{b \cdot P \cdot v}{A_k}, \tag{1}$$

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

$v$  – швидкість різання;

$b$  – частка теплоти [7], що поступає в деталь:

$$b = \frac{1}{\left[ \frac{1 + 1.18 \left( \frac{I_i}{I_o} \right) \sqrt{\frac{w_o}{nl}}}{\left( 2.34 + \ln \left( \frac{w_i t}{l^2} \right) \right)} \right]}, \tag{2}$$

де  $\lambda_i$  и  $\lambda_d$  – коефіцієнти теплопровідності інструменту і деталі;  
 $\omega_i$  и  $\omega_d$  – коефіцієнти температуропровідності інструменту і деталі;  
 $l$  – розмір смугового джерела;  
 $\tau$  – час дії джерела.

У момент проходження імпульсу струму через контактний майданчик інструменту з деталлю, в елементарному об'ємі  $dV$  за час  $\tau_i$  виділяється тепло за законом Джоуля-Ленца, рівне:

$$dQ = j^2 \cdot r \cdot dS \cdot dx \cdot t_i, \quad (3)$$

де  $j$  – густина імпульсу струму;  
 $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу заготовки.  
 Густина теплового потоку створюваного імпульсом струму:

$$q_e = \frac{b_e \cdot I \cdot U \cdot h}{A_k}, \quad (4)$$

де  $b_e$  – частка теплоти, що поступає в деталь при пропусканні електричного струму через контактний майданчик інструмент-деталь;

$I$  – амплітуда імпульсу струму прямокутної форми;

$U$  – величина напруги, що подається, з генератора імпульсного струму на різець та деталь;

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

Таким чином, у процесі різання, густина теплового потоку у момент проходження імпульсу струму через контактний майданчик інструменту з деталлю, буде дорівнюватися сумі  $q_p$  і  $q_e$ :

$$q_\Sigma = q_p + q_e = \frac{b \cdot P \cdot v + b_e \cdot I \cdot U \cdot h}{A_k}. \quad (5)$$

Температурне поле в деталі для смугового джерела, що швидко рухається, описується виразом [6]:

$$\Theta(x, y) = \frac{2q_\Sigma \sqrt{w_d h}}{I_d \sqrt{pv}} \sqrt{y} = \frac{2q_\Sigma \sqrt{w_d}}{I_d \sqrt{pv}} \sqrt{x}, \quad (6)$$

де  $x, y$  – координати точки деталі, для якої розраховується температура ( $x$  характеризує зміну температури по поверхні деталі у напрямі переміщення джерела,  $y$  – по нормалі до поверхні углиб деталі);

$h$  – довжина джерела теплоти (величина фаски зносу різця);

$\psi$  – безрозмірна абсциса точки у системі координат, що рухається з джерелом,  $\psi = x/h$ .

Максимальна температура знаходиться за формулою [6]:

$$\Theta_{\max} = \left( \frac{2q_\Sigma \sqrt{w_d \cdot h}}{I_d \sqrt{pn}} \right) \cdot K_M + T_{нс},$$

де  $K_M$  – коефіцієнт форми двомірного джерела теплоти, для нашого випадку  $K_M = 0,44$ ;

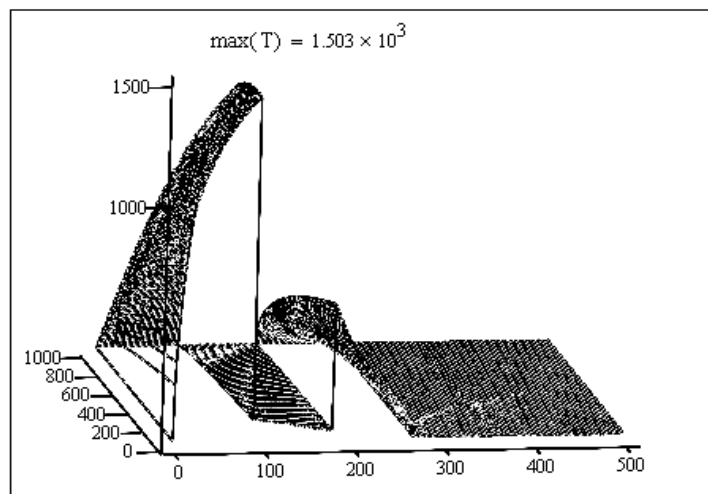
$T_{нс}$  – температура навколишнього середовища 20 °С.

У нашому випадку діє несиметричний нормальний закон розподілу  $q(\psi) = q_0 \exp(-3\psi^2)$  для двомірного джерела ( $\frac{2\pi I}{H_2 B U}$ ), що швидко рухається, який часто зустрічається при рішенні задач технологічної теплофізики [6].

Розроблений алгоритм у програмному продукті MathCAD:

$$\begin{aligned}
 q\Sigma := & \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..a \\ A_i \leftarrow \begin{cases} 0 & \text{if } \left( \frac{t_i}{T} - \text{floor} \left( \frac{t_i}{T} \right) \right) \cdot T > \tau_i \\ 0 & \text{if } \left( \frac{t_i}{T} - \text{floor} \left( \frac{t_i}{T} \right) \right) \cdot T = \tau_i \\ 0 & \text{if } t_i = 0 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \\ \frac{b \cdot Pz \cdot V}{h \cdot l} + \frac{be \cdot A \cdot U \cdot \eta}{h \cdot l} \end{array} \right. \\
 q := & \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..a \\ q_i \leftarrow q\Sigma_i \cdot e^{-3 \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot \max(y) \cdot t_i}{h} \right)^2} \end{array} \right. \\
 T := & \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 0..a \\ \text{for } j \in 0..d \\ T_{i,j} \leftarrow \begin{cases} \left[ \frac{\left[ \sqrt{\frac{(t_i \cdot y_{d-j}) \cdot 2 \cdot \pi}{h}} - \sqrt{\frac{(t_i \cdot y_{d-j}) \cdot 2 \cdot \pi}{h}} - 1 \right] \cdot 2 \cdot q_i \cdot \sqrt{\omega_d \cdot h \cdot 0.44}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot V}} \right] + 20 & \text{if } \left[ \frac{(t_i \cdot y_{d-j}) \cdot 2 \cdot \pi}{h} \right] > 1 \\ \left[ \frac{\left[ \sqrt{\frac{(t_i \cdot y_{d-j}) \cdot 2 \cdot \pi}{h}} \right] \cdot 2 \cdot q_i \cdot \sqrt{\omega_d \cdot h \cdot 0.44}}{\lambda \cdot \sqrt{\pi \cdot V}} \right] + 20 & \text{otherwise} \end{cases} \end{array} \right. \\
 T
 \end{aligned}$$

дозволяє отримати модель теплового поля (рис. 2, 3), що виникає у процесі ЕІЗТ.



T

Рис. 2. Теплове поле у безрозмірних координатах

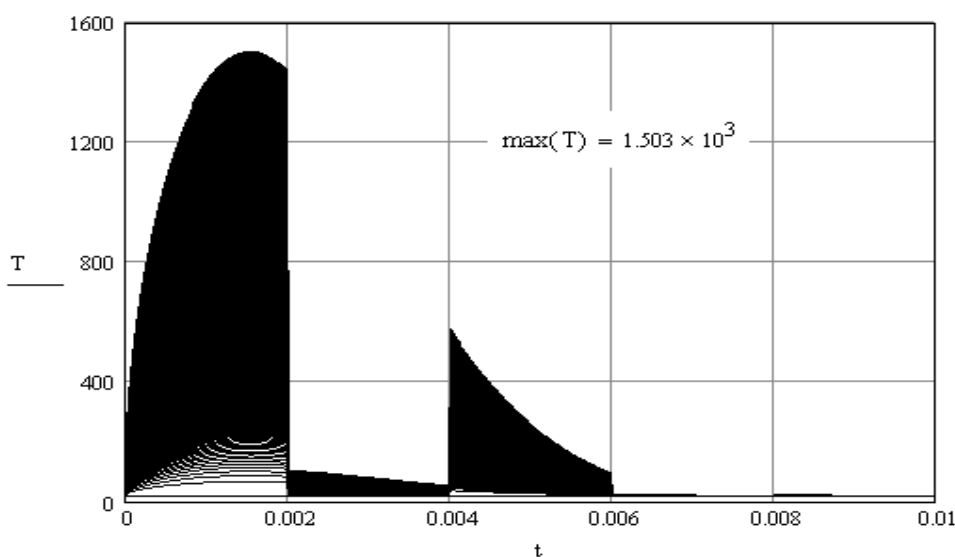


Рис. 3. Термічний цикл поверхневого шару деталі (матеріал деталі – сталь 45, швидкість різання  $v = 100$  м/хв., подача  $S = 0,2$  мм/об, глибина різання  $t = 0,5$  мм, період імпульсів технологічного струму  $T_i = 4$  мс, тривалість імпульсу  $\tau_i = 2$  мс, густина струму  $j = 1,25 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>)

#### ВИСНОВКИ

Розроблена методика визначення температурних полів у поверхневому шарі деталі при електроімпульсному зміцнювальному точінні, яка дозволяє визначити взаємний зв'язок між технологічними параметрами на вплив термічного циклу, керувати якістю обробки поверхні деталі при зміні технологічних параметрів. Для аналізу еволюції теплового поля у реальному часі і об'ємі поверхні є можливим застосування інтегральної температурно-часової характеристики, запропонованої автором [8].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Бабей Ю. И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Ю. И. Бабей. – К. : Наукова думка, 1988. – 238 с.
2. Гурей І. В. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів параметрами імпульсної фрикційної обробки : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук : спец. 05.02.08 «Технологія машинобудування» / І. В. Гурей. – Одеса, 2002. – 27 с.
3. Багмутов В. П. Математическое моделирование характеристик упрочненного поверхностного слоя от конструкторско-технологических параметров электромеханической обработки / В. П. Багмутов, И. Н. Захаров // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2005. – № 11. – С. 33–36.
4. Формирование регулярной дискретной структуры при чистовом точении с импульсным током. Ковалевский С. В., Тулунов В. И., Попивненко А. А., Борисенко Ю. Б. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С. 233–237.
5. Тулунов В. И. Повышение глубины упрочнения при электромеханическом чистовом точении / В. И. Тулунов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С. 277–282.
6. Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / А. Н. Резников. – М. : Машиностроение, 1981. – 279 с.
7. Резников А. Н. Тепловые процессы в технологических системах / А. Н. Резников, Л. А. Резников. – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
8. Иванцовский В. В. Технологические аспекты интеграции операций поверхностной закалки и шлифования на одном технологическом оборудовании : автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук : специальность 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки» / В. В. Иванцовский. – Новосибирск, 2007. – 35 с.