

УДК 621.787.001.57

В. Тулупов

Донбаська державна машинобудівна академія

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОМУ ЗМІЦНЮВАЛЬНОМУ ТОЧІННІ

**Резюме.** Запропоновано методику визначення температурних полів, що виникають у процесі електроімпульсного зміцнювального точіння, в поверхневому шарі деталі, яка обробляється, на основі методу джерел. Розроблена методика дозволяє проаналізувати термонапружений стан локального фрагмента заготовки у процесі обробки, що, в свою чергу, дає можливість (призначаючи відповідні режими обробки) керувати якістю поверхневого шару деталі, яка обробляється. Необхідність такої методики диктується проблемою експериментального визначення температури в зоні різання зважаючи на швидкоплинність процесу.

**Ключові слова:** деталь, ріжучий інструмент, імпульс струму, теплове поле, структура, зміцнений фрагмент.

V. Tulupov

## RESEARCH OF THE TEMPERATURE FIELDS AT THE ELECTRO-IMPULSIVE HARDENING BY LATHE TURNING

**The summary.** The method of determination of the temperature fields arising up in the process of the electro-impulsive hardening by lathe turning, in the superficial layer of workpart, on the basis of method of sources. The developed method allows to conduct the analysis of the thermal tense state of local fragment of purveyance in the process of turning, that in the turn enables (appointing the proper modes of turning) to manage quality of superficial layer of workpart. The necessity of such method is dictated by the problem of experimental determination of temperature in the area of cutting because of transience of process.

**Key words:** detail, cutting an instrument, impulse of current, thermal field, structure, hard fragment.

### Умовні позначення:

$A_k$  – площа електричного контакту інструменту з деталлю;

$v$  – швидкість різання;

$b$  – частка теплоти;

$\lambda_i$  і  $\lambda_o$  – коефіцієнти теплопровідності інструменту й деталі;

$\omega_i$  і  $\omega_o$  – коефіцієнти температуропровідності інструменту й деталі;

$l$  – розмір смугового джерела;

$\tau$  – час дії джерела;

$j$  – густина імпульсу струму;

$\rho$  – питомий електричний опір матеріалу заготовки;

$b_e$  – частка теплоти, що надходить у 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 і деталь;

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

$x, y$  – 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,  $\psi=x/h$ ;

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

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

**Постановка проблеми.** 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 обробляється.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** 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 й термодинамічні умови обробки металу мають 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 оцінювання динаміки температурних і деформаційних полів. Але у зв'язку з високою локальністю дії та великою швидкістю протікання процесу його експериментальне вивчення викликає деякі труднощі і тому виникає необхідність моделювання напружено-деформованого стану металу в зоні контакту інструмент – деталь.

**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.

Роботу виконано згідно з координаційним планом Комітету з питань науки і техніки та Міністерства освіти і науки України з розділу “Машинобудування” та “Високоєфективні технологічні процеси в машинобудуванні” на 2010...2015 роки.

**Результати досліджень.** Сучасні методи зміцнення поверхневого шару деталей машин, переважно, ґрунтуються на застосуванні концентрованих потоків енергії (КПЕ), дію яких направлено на отримання структур, що мають високу твердість і міцність. До таких методів відносять і електроімпульсне зміцнювальне точіння (ЕІЗТ) [3, 4].

ЕІЗТ – спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей, що включає механічну обробку чистовим точінням із 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, яку обробляють, зміцнених фрагментів, що утворюють РДС, визначають частотою і тривалістю імпульсів струму, а також режимами механічної обробки (поздовжною подачею і частотою обертання шпинделя). Твердість фрагментів залежатиме від температурно-часового режиму, марки матеріалу, що обробляється, та його початкового стану.

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, а також джоулеве тепло, що виділяється при проходженні імпульсу струму через контакт інструмент – деталь [5, 6]. Тепло, яке виділяють ці джерела, йде на нагрівання деталі та інструменту, а також у навколишнє середовище.

Для постановки завдання з дослідження теплових полів при ЕІЗТ необхідно визначити умови протікання процесу і 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, вісь  $Y$  – по нормалі до поверхні углуб 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 менша за розміри самої деталі, то останню розглядаємо як напівнескінченне тіло. Джерело теплоти, що виникає на поверхні заготовки в результаті взаємодії з інструментом, розглядаємо як рухомий смуговий, шириною  $l$ , визначається умовами контакту інструменту з деталлю, з рівномірним розподілом густини теплового потоку.

За часом функціонування джерело діє періодично (потужність потоку змінюється в тому часі, коли струм, що застосовують – імпульсний, прямокутної форми).

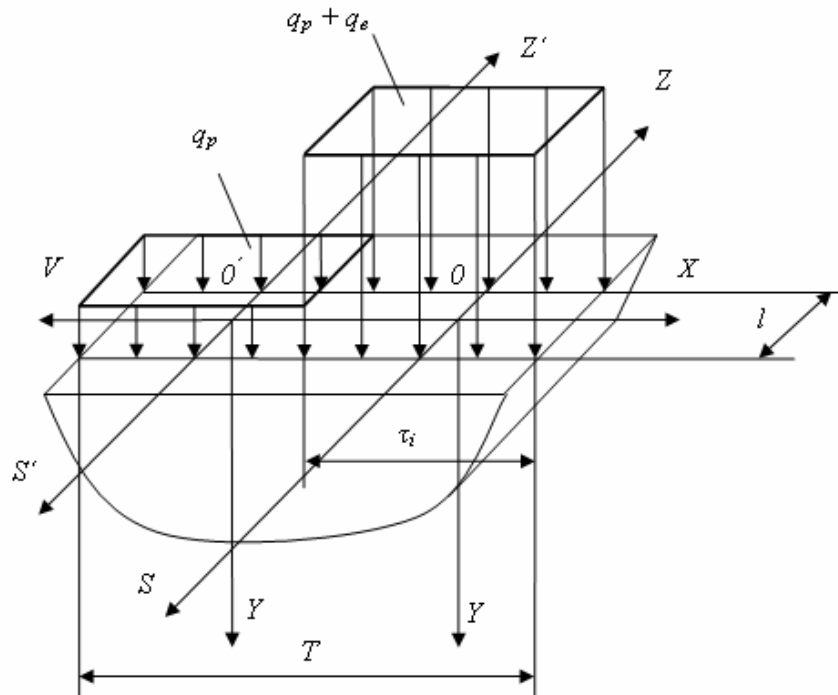


Рисунок 1 – Схема формування теплових потоків у процесі ЕІЗТ

Потужність джерела теплоти процесу різання визначають швидкістю його переміщення  $v$  і силою  $P$ , що діє у напрямі переміщення в зоні обробки і дорівнює  $W_m = Pv$ , а у момент проходження імпульсу струму тривалістю  $\tau_i$ , цю потужність підсумовують із потужністю імпульсу струму  $W_e = U \cdot I \cdot \eta_v$ .

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

$$q_p = \frac{b \cdot P \cdot v}{A_k}, \quad (1)$$

$b$  – частка теплоти [7], що надходить у деталь:

$$b = \frac{1}{\left[ \frac{1 + 1.18 \left( \frac{\lambda_s}{\lambda_a} \right) \sqrt{\frac{\omega_a}{\nu}}}{\left( 2.34 + \ln \left( \frac{\omega_i \tau}{l^2} \right) \right)} \right]} \quad (2)$$

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, що дорівнює

$$dQ = j^2 \cdot \rho \cdot dS \cdot dx \cdot \tau_i. \quad (3)$$

Густина теплового потоку створюваного імпульсом струму

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

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

$$q_\Sigma = q_p + q_e = \frac{b \cdot P \cdot v + b_e \cdot I \cdot U \cdot \eta}{A \hat{e}}. \quad (5)$$

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

$$\Theta(x, y) = \frac{2q_{\Sigma}\sqrt{\omega_a \cdot h}}{\lambda_a \sqrt{\pi v}} \sqrt{\psi} = \frac{2q_{\Sigma}\sqrt{\omega_a}}{\lambda_a \sqrt{\pi v}} \sqrt{x}. \quad (6)$$

Максимальну температуру знаходимо за формулою [6]

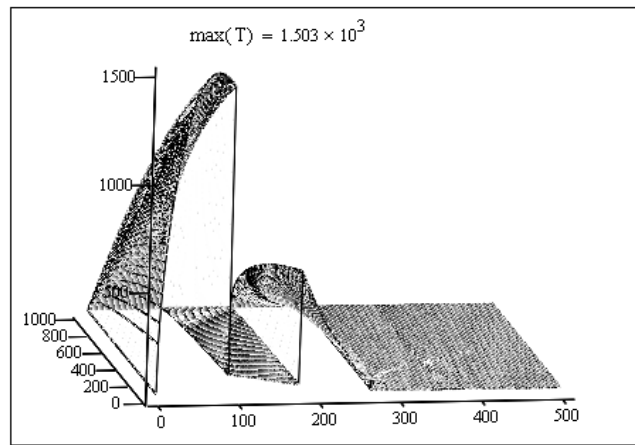
$$\Theta_{\max} = \left( \frac{2q_{\Sigma}\sqrt{\omega_a \cdot h}}{\lambda_a \sqrt{\pi v}} \right) \cdot K_M + T_{нс}.$$

У нашому випадку діє несиметричний нормальний закон розподілу  $q(\psi) = q_0 \exp(-3\psi^2)$  для двовірного джерела  $\left( \frac{2\Pi l}{H_2 B U} \right)$ , що швидко рухається, який часто зустрічаємо при розв'язуванні задач технологічної теплофізики [6].

Розроблений алгоритм у програмному продукті Math CAD

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

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



Т  
Рисунок 2 – Теплове поле у безрозмірних координатах

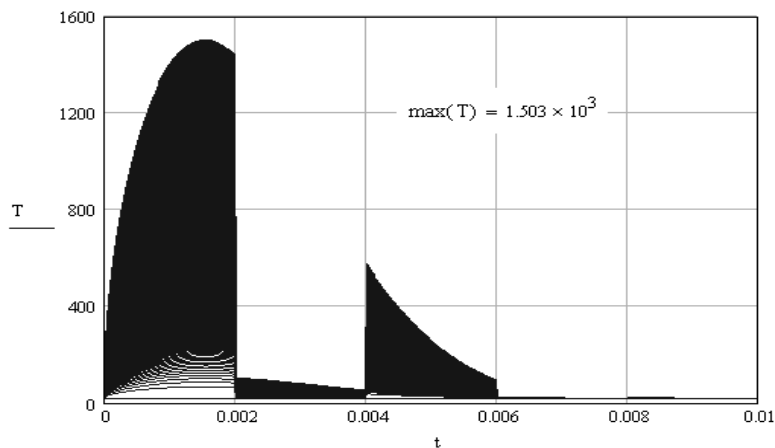


Рисунок 3 – Термічний цикл поверхневого шару деталі (матеріал деталі – сталь 45, швидкість різання  $v=100$  м/хв., подача  $S=0,2$  мм/об., глибина різання  $t=0,5$  мм, період імпульсів технологічного струму  $T_i=4$  мс, тривалість імпульсу  $\tau_i=2$  мс, густина струму  $j=1,25 \cdot 10^3$  А/мм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

**Висновки.** Розроблена методика визначення температурних полів у поверхневому шарі деталі при ЕІЗТ 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 й об'ємі поверхні є можливим застосування інтегральної температурно-часової характеристики, яку запропонував автор [8].

#### Література

1. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна / Юлий Иванович Бабей. – К.: Наукова думка, 1988. – 238 с.
2. Гурей І.В. Технологічне забезпечення якості та експлуатаційних властивостей виробів параметрами імпульсної фрикційної обробки: авторефер. 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. Ковалевский С. В. Формирование регулярной дискретной структуры при чистовом точении с импульсным током / В.И. Тулупов, А.А. Попивненко, Ю.Б. Борисенко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2007. – №21. – С. 233 – 237.

5. Тулупов В.И. Повышение глубины упрочнения при электромеханическом чистовом точении / В.И. Тулупов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2008. – № 23. – С. 277 – 282.
6. Резников А.Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов / Арон Наумович 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: авторефер. дис. на соискание науч. степени доктора техн. наук: спец. 05.03.01 „Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки” / В.В. Иванцовский. – Новосибирск, 2007. – 35 с.

Одержано 12.01.2010 р.