

УДК 621.787.001

С.В. Ковалевський, д.т.н., проф.

В.І. Тулупов, аспір.

Донбаська державна машинобудівна академія

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І РОЗРАХУНОК ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ ПРИ ЕЛЕКТРОІМПУЛЬСНОМУ ЗМІЦНЮВАЛЬНОМУ ТОЧІННІ

*Запропоновано методика визначення температурних полів, що виникають у процесі електроімпульсного зміцнювального точіння (ЕІЗТ), в поверхневому шарі деталі яка обробляється, на основі методу джерел. Розроблена методика дозволяє провести аналіз термонапруженого стану локального фрагменту 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.*

**Вступ.** Однією з актуальних задач сучасного машинобудування є забезпечення працездатності і довговічності деталей машин. Це призводить до необхідності підвищення ефективності і якості процесів механічної обробки, вимагає створення нових і вдосконалення існуючих технологічних методів.

Перспективними є методи, що дозволяють забезпечити необхідну структуру, напружено-деформований стан, фазовий і хімічний склад поверхневого шару металу, а також оптимальний розподіл фізико-механічних властивостей на зміцненій поверхні залежно від конкретних умов експлуатації деталей машин.

Великими потенційними можливостями в поліпшенні експлуатаційних властивостей поверхонь деталей, працюючих в умовах тертя і контактних навантажень, володіють методи, засновані на застосуванні концентрованих потоків енергії, що пов'язано з локальністю дії на поверхню, які обробляється. Серед них, має місце електроімпульсне зміцнювальне точіння (ЕІЗТ) [1, 2], засноване на розмірній обробці різанням, що супроводжується локальним нагрівом металу імпульсним струмом.

Суть цього методу полягає в тому, що одночасно з формоутворенням проводиться зміцнення при утворенні в поверхневому шарі регулярних дискретних структур [1]. Унікальною особливістю швидкісної електротермічної

обробки сталі є, формування особливо дисперсних структур стали, які додають їй високу міцність і пластичність.

При ЕІЗТ, імпульс струму великої амплітуди і малої тривалості, проходячи через зону різання (зону контакту задньої поверхні різця з поверхнею деталі), викликає виділення джоулевого тепла, яке додатково з теплом, що виділяється в процесі різання, розігріває локальну ділянку до температур які перевищують значення точки  $A_{c3}$  для даного матеріалу.

Розглядаючи дію двох джерел теплоти – механічного і електричного, виконаємо моделювання теплового поля, що у результаті їх дії виникає. Для дослідження теплового стану деталі при обробці використаємо метод Гріна. Джерелами теплоти у процесі обробки ЕІЗТ є внутрішнє тертя пружно-пластичної деформації поверхневого шару деталі, тертя задньої поверхні різця з деталлю, а також електронагрів при проходженні імпульсу струму через контакт «різець-деталь» [3, 4]. Тепло, що виділяється цими джерелами йде на нагрів деталі та інструмента, а також в навколишнє середовище.

**Постановка проблеми.** Для постановки задачі, при дослідженні теплових полів, що виникають у процесі обробки 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 вздовж руху джерела тепла, вісь  $Y$  – по нормалі до поверхні углиб деталі. На схемі формування теплових потоків:  $\tau_i$  – тривалість імпульсу струму і  $T_i$  – період повторення імпульсів.

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

Найбільш інтенсивне тепловиділення, що здійснюється у зоні контакту різця з деталлю у момент проходження імпульсу струму. Так як швидкість обертання деталі порівняно велика та час контакту з дільницею деталі дуже малий, то вирівнюванням температури можна нехтувати.

Припустимо, що різець і деталь у зоні контакту по задній поверхні мають однакову температуру. Джерелом теплоти приймаємо різець, а як зона концентрації теплоти – поверхня його контакту з поверхнею деталі, що обробляється. У процесі зміцнення [5] різець має електричний контакт з деталлю по деякому майданчику величиною  $A_k$  (тільки через задню поверхню). Кожна точка поверхні  $A_k$ ,

рухаючись з швидкістю  $V$ , піддається дії з боку плоского джерела теплоти протягом часу:

$$\tau = \frac{h_c}{V} \cdot \quad (1)$$

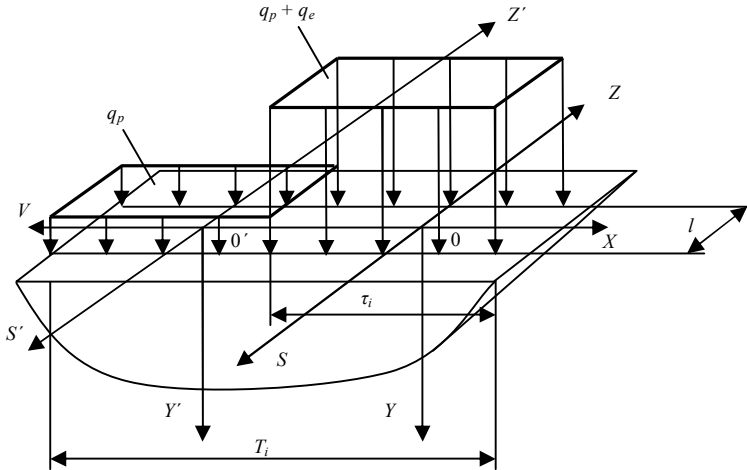


Рис. 1. Схема формування теплових потоків у процесі ЕІЗТ

Дію обмеженого плоского джерела теплоти уподібнимо дії безмежно великого плоского джерела, а час його дії приймемо рівним  $\tau$ . У цьому випадку температурне поле в деталі, що приймається за напівбезмежне тіло, буде одновимірним і диференціальне рівняння теплопровідності запишеться у вигляді [6, 7]:

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

за початкових і граничних умов:

$$\Theta_{(y,\tau)}|_{y=0} = \Theta_0; \quad \Theta_{(y,\tau)}|_{y=l} = \Theta_\delta; \quad \frac{\partial \Theta_{(y,\tau)}}{\partial y}|_{y=\infty} = 0, \quad (3)$$

де  $\Theta_0$  – початкова температура деталі, яка дорівнює температурі навколишнього середовища;  $\Theta_\delta$  – температура джерела теплової енергії.

В умовах миттєвої дії плоского джерела теплоти на поверхню напівбезмежного тіла, рішення рівняння (2) має вигляд:

$$\Theta = 2q_3 \sqrt{\frac{\tau}{c\rho\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{a\tau}}\right), \quad (4)$$

де  $q_3$  – 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;

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

Температура на глибині  $y$  буде визначатися так:

$$\Theta(y, \tau) = 2q_3 \sqrt{\frac{\tau}{c\rho\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{a\tau}}\right). \quad (5)$$

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

$$W_m = P \cdot v. \quad (6)$$

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

$$W_m = U \cdot I \cdot \eta. \quad (7)$$

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

$$q_p = \frac{b_p \cdot P \cdot v}{A_k}, \quad (8)$$

де  $A_k$  – площа електричного контакту інструменту з деталлю;  $v$  – швидкість різання;  $b_p$  – частина теплоти що поступає в деталь, яка пов'язана з процесом різання

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:

$$dQ = j^2 \cdot \rho \cdot dS \cdot dx \cdot \tau, \quad (9)$$

де  $j$  – щільність імпульсу струму;  $\rho$  – питомий електричний опір матеріалу заготовки.

Густина теплового потоку створюваного імпульсом струму:

$$q_e = \frac{b_e \cdot I \cdot U \cdot \eta}{Ak}, \quad (10)$$

де  $b_e$  – частина теплоти, що поступає в деталь при пропусканні електричного струму через контактний майданчик «різець-деталь»;  $I$  – амплітуда імпульсу струму;  $U$  – 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, загальна густина теплового потоку у момент проходження імпульсу струму через контактний майданчик «різець-деталь», буде дорівнюватися сумі  $q_p$  і  $q_e$ :

$$q_s = q_p + q_e = \frac{bP_y v + b_e I U \eta}{Ak}. \quad (11)$$

Підставимо у (5) замість  $q_s$  вираз (11):

$$\Theta(y, \tau) = 2 \cdot \frac{bP_y v + b_e I U \eta}{Ak} \cdot \sqrt{\frac{\tau}{c\rho\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{a\tau}}\right). \quad (12)$$

Використовуючи залежність (12) була отримана графічна модель теплового поля (рис. 2), що виникає у процесі ЕІЗТ.

Для визначення швидкості нагріву одиничного майданчика необхідно температуру нагріву вираз (5) поділити на час дії джерела  $\tau$ :

$$V_H = \frac{2q_s \sqrt{\frac{\tau}{c\rho\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{a\tau}}\right)}{\tau}. \quad (13)$$

Тоді залежність швидкості нагріву від глибини розповсюдження температури та часу дії джерела теплоти:

$$V_H(y, \tau) = \frac{2q_s \sqrt{\frac{\tau}{c\rho\lambda}} \operatorname{ierfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{a\tau}}\right)}{\tau}. \quad (14)$$

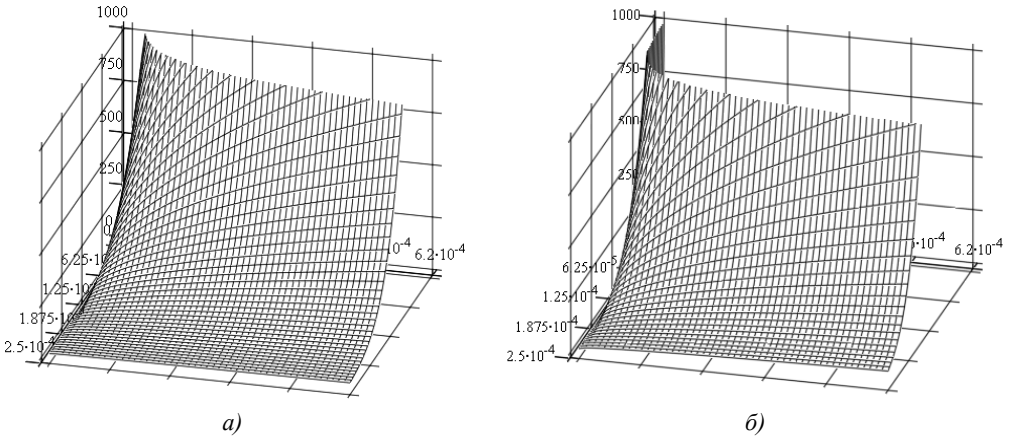


Рис. 2. Зміна температури нагріву поверхневого шару металу в зоні одиничного контакту інструменту і деталі (сталь 40ХН, швидкість різання  $v = 60$  м/хв.,  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с, подача  $S = 0,2$  мм/об., глибина різання  $t = 0,5$  мм): а – густина струму  $j = 0,35 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>; б – густина струму  $j = 1 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>

Використовуючи залежність (14) була отримана графічна модель зміни швидкості за глибиною та залежно від часу дії джерела теплоти (рис. 3). Слід відмітити, що на розподіл температури у поверхневому шарі деталі та швидкість розповсюдження температури суттєво впливає швидкість різання і величина імпульсного струму. Швидкість нагріву при густині струму  $j = 0,35 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup> вище більш чім у 4 рази ніж при густині струму  $j = 1,0 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>.

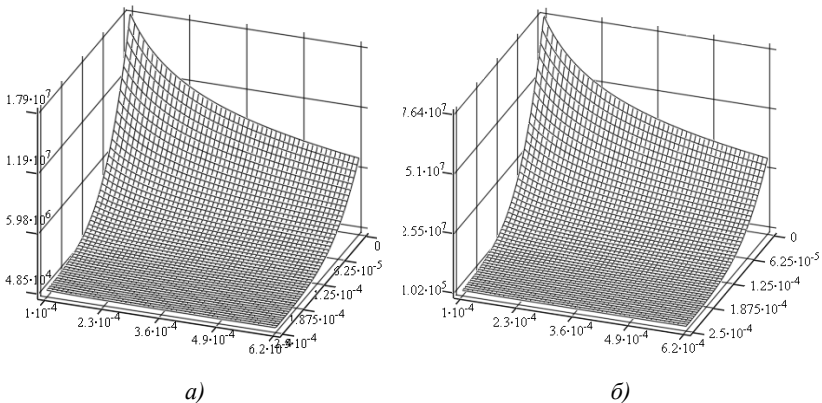


Рис. 3. Зміна швидкості нагріву поверхневого шару металу в зоні одиночного контакту інструмента і деталі (сталь 40ХН, швидкість різання  $v = 60$  м/об.,  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с, подача  $S = 0,2$  мм/об., глибина різання  $t = 0,5$  мм): а – густина струму  $j = 0,35 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>; б – густина струму  $j = 1 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>

За побудованим графіком температури на стадії нагріву (рис. 4) при досягненні часу  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с ми можемо визначити глибину шару на якій буде відбуватися фазове перетворення у поверхневому шарі деталі зі сталі 40ХН (швидкість різання  $v = 60$  м/об.,  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с, подача  $S = 0,2$  мм/об., глибина різання  $t = 0,5$  мм). 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.

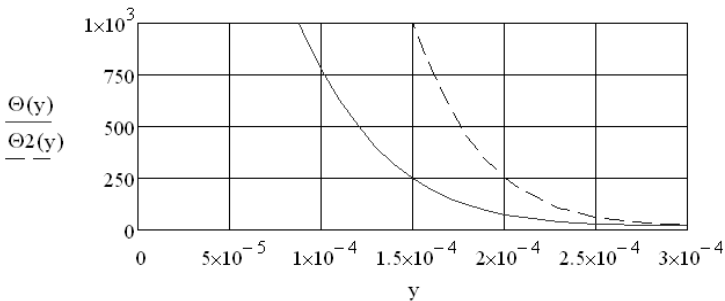


Рис. 4. Температура на стадії нагріву при  $\tau = 6,2 \cdot 10^{-4}$  с (суцільним – густина струму  $j = 0,35 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>; пунктиром – густина струму  $j = 1 \cdot 10^3$  А/мм<sup>2</sup>)

**Висновки.** Отримані теоретичні розрахунки розподілу температури нагріву по глибині поверхневого шару узгоджуються з проведеними експериментальними дослідженнями по визначенні товщини зміцненого шару при різних режимах ЕІЗТ.

Розроблена математична модель визначення розподілу температури дозволяє оптимізувати режими ЕІЗТ для забезпечення заданої глибини зміцненого шару сталевих деталей.

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Патент № 28828, МПК В23Н 5/00. Спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей / С.В. Ковалевский, В.И. Тулунов,

- Л.П. Колот.* – № u200708520 ; заяв. 24.07.2007 ; опубл. 25.12.2007 ; Бюл. № 21.
2. Патент № 31437, МПК В23Н 5/00. Спосіб місцевого зміцнення сталевих деталей / *С.В. Ковалевский, В.И. Тулупов, С.Г. Онищук.* – № u200713240 ; заяв. 28.11.2007 ; опубл. 10.04.2008 ; Бюл. № 7.
  3. *Резников А.Н.* Тепловые процессы в технологических системах : учебник / *А.Н. Резников, Л.А. Резников.* – М. : Машиностроение, 1990. – 288 с.
  4. Формирование регулярной дискретной структуры при чистовом точении с импульсным током / *С.В. Ковалевский, В.И. Тулупов, А.А. и др.* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – Вип. 21. – С. 233–237.
  5. *Тулупов В.И.* Повышение глубины упрочнения при электромеханическом чистовом точении / *В.И. Тулупов* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – Вип. 23. – С. 277–282.
  6. *Сапожников С.З.* Техническая термодинамика и теплопередача : учебник / *С.З. Сапожников, Э.Л. Китанин.* – СПб. : Изд-во СПбГТУ, 1999. – 319 с.
  7. *Гурей І.В.* Визначення температури в зоні контакту при фрикційному зміцненні деталей машин / *І.В. Гурей, Т.А. Гурей* // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – Вип. 17. – С. 44–48.

КОВАЛЕВСЬКИЙ Сергій Вадимович – доктор технічних наук, професор кафедри технології і управління виробництвом Донбаської державної машинобудівної академії.

Наукові інтереси:

- зміцнювальні методи обробки;
- комбіновані методи обробки.

ТУЛУПОВ Володимир Іванович – аспірант Донбаської державної машинобудівної академії.

Наукові інтереси:

- програмування;
- електроімпульсна обробка матеріалів.



Подано 17.06.2011

