

УДК 621.9: 658.5

Івченко Т.Г., Нечепасєв В.Г., Гнисько, О.М.

Донецький національний технічний університет, Донецьк, Україна

ВПЛИВ СПОСОБУ ПОДАЧІ ОХОЛОДЖУЮЧОГО СЕРЕДОВИЩА НА ТЕМПЕРАТУРУ РІЗАННЯ

The theoretical and experimental investigation of cutting tools temperature used for increasing of reliability. The improvement of cutting tools effective exploitation is made by substantiation of optimal temperature level and creation the optimum cutting conditions.

Теплові явища мають істотний вплив на працездатність ріжучого інструменту та продуктивність механообробки. Застосування мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ – найбільш ефективний шлях зниження температури і підвищення стійкості інструмента. У зв'язку з цим досить актуальна розробка методів керування тепловими явищами в зоні обробки в умовах конвективного теплообміну.

В наступний час значно зростає роль теоретичних методів дослідження теплових процесів при різанні. Одним з аналітичних методів рішення теплових задач є метод джерел теплоти [1], який характеризується достатньою простотою і наочністю в порівнянні з іншими аналітичними і чисельними методами. Однак метод джерел не дозволяє розраховувати температури для різних граничних умов на поверхнях леза інструмента при конвективному теплообміні. Дослідження впливу охолоджуючих технологічних середовищ на температуру різання найбільш доцільно вести з використанням методу кінцевих різностей [1, 2]. Відомі закономірності зміни коефіцієнта тепловіддачі α елементів технологічних систем в умовах конвективного теплообміну не охоплюють питань розрахунку температури різання в залежності від способу подачі охолоджуючого середовища в зону різання [3].

Метою представленої роботи є дослідження впливу способу подачі охолоджуючого середовища на температуру різання з використанням методу кінцевих різностей.

Для теоретичного опису двомірного стаціонарного температурного поля використовується диференціальне рівняння теплопровідності [1, 2]:

$$\frac{\partial^2 \Theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial y^2} = 0; \quad \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} = 0; \quad \frac{\partial \Theta}{\partial \tau} = 0, \quad (1)$$

де Θ, x, y, z, τ - температура, координати точок тіла і час.

На рис.1 представлена схема для розрахунку температурного поля леза інструмента методом кінцевих різностей.

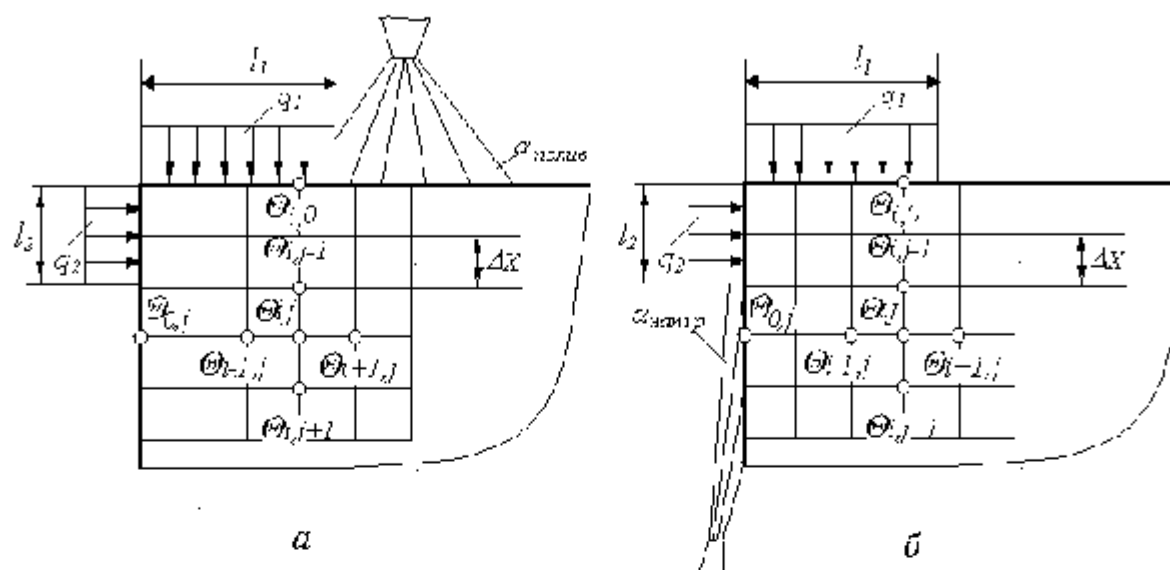


Рис. 1. Схема для розрахунку температурного поля ріжучого леза:
 а) полив вільно падаючим струменем охолоджуючого середовища;
 б) струйно-напірна подача охолоджуючого середовища

Перетин леза розбитий на n квадратних площадок зі стороною квадрата ΔX . Для довільно виділеного i, j вузла, що має температуру θ_{ij} , показані чотири сусідні точки, що утворюють зазначену квадратну область: $i-1, j$; $i, j-1$; $i+1, j$; $i, j+1$ з відповідними температурами $\theta_{i-1, j}$; $\theta_{i, j-1}$; $\theta_{i+1, j}$; $\theta_{i, j+1}$.

При схематизації компонентів досліджуваної системи лезо інструменту розглядається у виді необмеженого клина з кутом загострення β . Для багатограничних непереточуваних пластин цей кут приймається рівним $\beta = 90^\circ$. Джерела теплоти, що виникають на передній і задній поверхнях леза інструмента, представляються двовимірними прямокутними з розмірами $b \times l_1$ та $b \times l_2$ (l_1 - довжина контакту стружки з передньою поверхнею в напрямку сходу стружки, l_2 - довжина контакту деталі з задньою поверхнею, b - ширина контактної площадки) з рівномірними законами розподілу щільності теплового потоку.

На площадках контакту леза зі стружкою і деталлю мають місце граничні умови другого роду, обумовлені щільністю теплових потоків q_1 та q_2 :

$$q_1 = V(P_{Z0} \sin \gamma + P_{N0} \cos \gamma) / 2st [k(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma] k, \quad q_2 = 1,92 \sigma_b V, \quad (2)$$

де V - швидкість різання; s - подача; t - глибина різання; k - коефіцієнт подовжньої усадки стружки; γ - передній кут різця; $P_{Z0} = P_z - F_{m3}$ - різниця тангенціальної сили різання P_z і сили тертя по задній поверхні леза F_{m3} ;

$P_{NO} = P_y - F_{mn}$ - різниця нормальної складової сили різання P_y і сили тертя по передній поверхні леза F_{mn} ; σ_b - границя міцності оброблюваного матеріалу.

Передбачається, що при обробці без охолоджуючого середовища інші ділянки поверхонь пластини є адіабатичними, тобто, не обмінюються теплотою з навколишнім середовищем і віддаленими від джерела тепловиділення поверхнями, для них $q_s = 0$. При використанні охолоджуючого середовища на омиваних поверхнях пластини виникають граничні умови третього роду:

$$q_s = \alpha (\Theta_s - \Theta_o),$$

де Θ_s і Θ_o – температури поверхні й охолоджуючого середовища.

Для довільно виділеного i, j вузла рівняння в кінцево-різностному вираженні має вигляд:

$$\Theta_{i+1,j} + \Theta_{i-1,j} + \Theta_{i,j+1} + \Theta_{i,j-1} - 4\Theta_{i,j} = 0, \quad \text{якщо } i \geq 1, j \geq 1. \quad (3)$$

Для вузлів на границях зазначеної квадратної області ці рівняння мають вигляд:

- на площадках контакту леза зі стружкою і деталлю:

$$\begin{aligned} \Theta_{i,0} - \Theta_{i,1} &= q_1 / \lambda \Delta X, \quad \text{якщо } i \cdot \Delta X \leq l_1; \\ \Theta_{0,j} - \Theta_{1,j} &= q_2 / \lambda \Delta X, \quad \text{якщо } j \cdot \Delta X \leq l_2. \end{aligned} \quad (4)$$

- на адіабатичних ділянках поверхонь леза:

$$\begin{aligned} \Theta_{i+1,0} + \Theta_{i-1,0} + 2\Theta_{i,1} - 4\Theta_{i,0} &= 0, \quad \text{якщо } i \cdot \Delta X \geq l_1; \\ \Theta_{0,j+1} + \Theta_{0,j-1} + 2\Theta_{1,j} - 4\Theta_{0,j} &= 0, \quad \text{якщо } j \cdot \Delta X \geq l_2. \end{aligned} \quad (5)$$

- на омиваних поверхнях леза:

$$\begin{aligned} \Theta_{i+1,0} + \Theta_{i-1,0} + 2\Theta_{i,1} - 4\alpha\Theta_{i,0} / \lambda \Delta X &= -\alpha\Theta_o / \lambda \Delta X, \quad \text{якщо } i \cdot \Delta X \geq l_1; \\ \Theta_{0,j+1} + \Theta_{0,j-1} + 2\Theta_{1,j} - 4\alpha\Theta_{0,j} / \lambda \Delta X &= -\alpha\Theta_o / \lambda \Delta X, \quad \text{якщо } j \cdot \Delta X \geq l_2. \end{aligned} \quad (6)$$

- для інших поверхонь:

$$\begin{aligned} \Theta_{i+1,j} + \Theta_{i-1,j} + 2\Theta_{i,j-1} - 4\Theta_{i,j} &= 0, \quad \text{якщо } j = n; \\ \Theta_{i+1,j} + \Theta_{i-1,j} + 2\Theta_{i,j-1} - 4\Theta_{i,j} &= 0, \quad \text{якщо } i = n; \\ \Theta_{i-1,j} + \Theta_{i,j-1} - 2\Theta_{i,j} &= 0, \quad \text{якщо } i = n, j = n. \end{aligned} \quad (7)$$

На підставі вказаних виразів (3, 4, 5, 6, 7) складається система лінійних рівнянь в кінцево-різностному вираженні, рішенням якої буде температура $\Theta_{i,j}$ для кожного i,j вузла.

Температура різання може бути розрахована наступним чином:

$$\Theta_P = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \Theta_{i0} + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \Theta_{0j}, \quad (8)$$

де k і m – кількість вузлів на площадках контакту леза зі стружкою і деталлю: $k = l_1 / \Delta X$, $m = l_2 / \Delta X$.

Для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при змушеній конвекції середовища, що виникає у випадку примусового руху охолоджуючого середовища у зоні різання, використовується критеріальне рівняння [1, 3]:

$$Nu_o = C Re_o^m Pr_o^n Gr_o^p (Pr_o / Pr_S)^{0,25}, \quad (9)$$

де C, m, p, x, y, z – коефіцієнт і показники ступенів, що залежать від способу подачі рідини в зону обробки.

До складу рівняння (9) входять чотири безрозмірних комплекси:

$$Nu_o = \alpha l / \lambda; Re_o = wl / \nu; Pr_o = \nu / \omega; Gr_o = \beta (\Theta_s - \Theta_o) g l^3 / \nu^2, \quad (10)$$

де Nu_o – критерій Нуссельта; Re_o – критерій Рейнольдса; Pr – критерій Прандтля; Gr_o – критерій Грасгофа; α – коефіцієнт тепловіддачі; l – характерний розмір; w – швидкість потоку; ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості середовища; ω – коефіцієнт температуропроводності; β – коефіцієнт об'ємного розширення; g – прискорення вільного падіння.

Для охолодження інструмента переважно використовуються охолоджуючі середовища на основі водних розчинів, що мають теплофізичні властивості, близькі до властивостей води.

Подача охолоджуючого середовища у зону різання вільно падаючим струменем рідини є найпростішим і найбільш розповсюдженим способом, при якому струмінь направляється як на стружку, так і на інструмент. Ефективність охолодження залежить від витрати охолоджуючого середовища, розмірів і напрямку струменя. Під час подачі водних розчинів вільним польвом, схема якого представлена на рис.1а, критеріальне рівняння (9) та визначений на його підставі коефіцієнт тепловіддачі мають вигляд:

$$Nu_o = 0,28 Re_o^{0,6} Pr_o^{0,36} (Pr_o / Pr_S)^{0,25}, \alpha_{новие} = 1,9 \cdot 10^3 w^{0,6} / l^{0,4}, \quad (11)$$

де l - характерний розмір, який за умов поперечного обтікання тіла рідиною визначається як еквівалентний діаметр з обліком розмірів інструменту B і H : $l = d_{\text{екв}} = 4F/P = BH/2(B + H)$.

У зв'язку з тим, що при різанні на поверхнях леза інструмента в процесі механообробки виникають значно більш високі температури, чим 100°C , необхідно враховувати особливості теплообміну при зміні агрегатного стану рідини – кипінні [1, 3]:

$$\begin{aligned} \alpha_x &\approx 170(\Theta_s - 100)^{1,86} \text{ при } \Theta_s < 120^{\circ}\text{C}; \\ \alpha_x &= 3,33 \cdot 10^6 (\Theta_s - 100)^{-1,43} \text{ при } \Theta_s < 120^{\circ}\text{C}. \end{aligned} \quad (12)$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі α_{np} , що враховує спільний вплив кипіння і конвективного теплообміну визначається таким чином:

$$\begin{aligned} \alpha_x &\approx \alpha \text{ при } \alpha_x \leq 0,5\alpha; \\ \alpha_{np} &\approx \alpha_x \text{ при } \alpha_x \geq 2\alpha; \\ \alpha_{np} &= \alpha \left[(4\alpha + \alpha_x) / (5\alpha - \alpha_x) \right] \text{ при } 0,5\alpha \leq \alpha_x \leq 2\alpha, \end{aligned} \quad (13)$$

де α_x і $\alpha = \alpha_{\text{молит}}$ - відповідно незалежно розраховані коефіцієнти тепловіддачі при кипінні і при конвективному теплообміні.

Сутність струйно-напірного способу полягає в подачі охолоджуючого середовища тонким струменем з тиском до 2 МПа в зону контакту інструмента з оброблюваною деталлю з боку задньої поверхні.

При струйно-напірній подачі водних розчинів, схема якої представлена на рис.1б, критеріальне рівняння (9) та визначений на його підставі коефіцієнт тепловіддачі мають вигляд:

$$Nu_o = 0,021 Re_o^{0,8} Pr_o^{0,43} (Pr_o / Pr_s)^{0,25}, \quad \alpha_{напир} = 2,6 \cdot 10^3 w^{0,8} / l^{0,2}, \quad (14)$$

де l - характерний розмір, який за умови подовжнього обтікання тіла рідиною приймається як розмір по напрямку її плину $l = H$.

При високих швидкостях для всіх температур $\alpha_x < 0,5\alpha$; тому при струйно-напірній подачі коефіцієнт тепловіддачі практично не залежить від температури і на нього не впливає зміна агрегатного стану охолоджуючого середовища - кипіння: $\alpha_x \approx \alpha_{напир}$.

На рис.2 наведені графіки залежності коефіцієнта тепловіддачі α від швидкості охолоджуючого середовища w і довжини омиваної поверхні l при вільному поливі і струйно-напірній подачі, які дозволяють визначити характер та ступінь зв'язку між цими параметрами, а також діапазон зміни значень коефіцієнта тепловіддачі α при різних способах подачі охолоджуючого середовища.

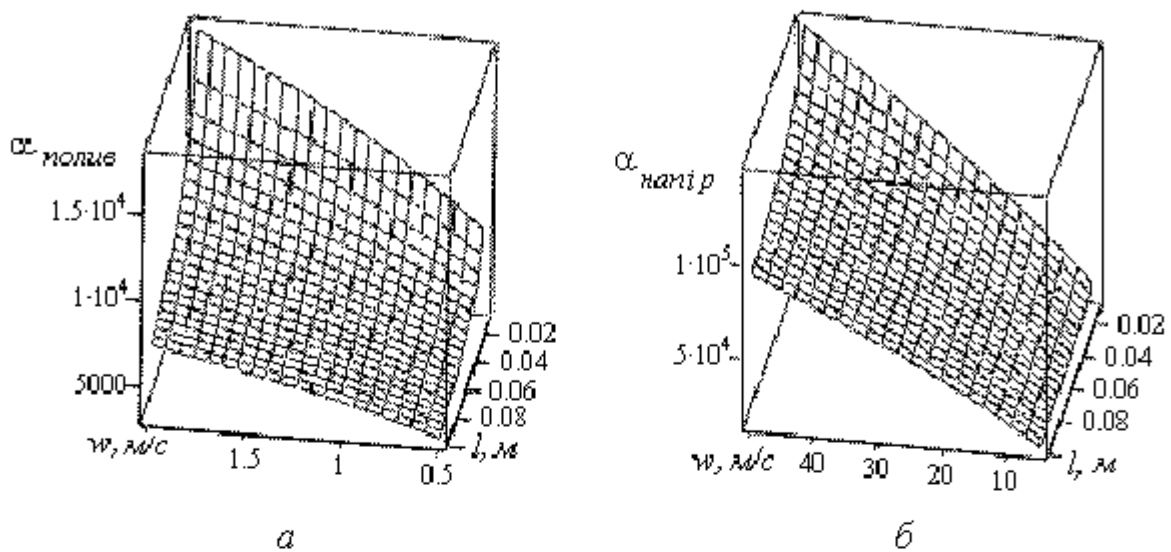


Рис.2. Графіки залежності коефіцієнта тепловіддачі α від швидкості охолоджуючого середовища w і довжини омиваної поверхні l при вільному поливі - а) і струйно-напірній подачі - б)

На рис. 3 наведені графіки залежності коефіцієнта зниження температури різання під впливом охолоджуючого середовища від коефіцієнта тепловіддачі при поливі вільно падаючим струменем та при струйно-напірній подачі.

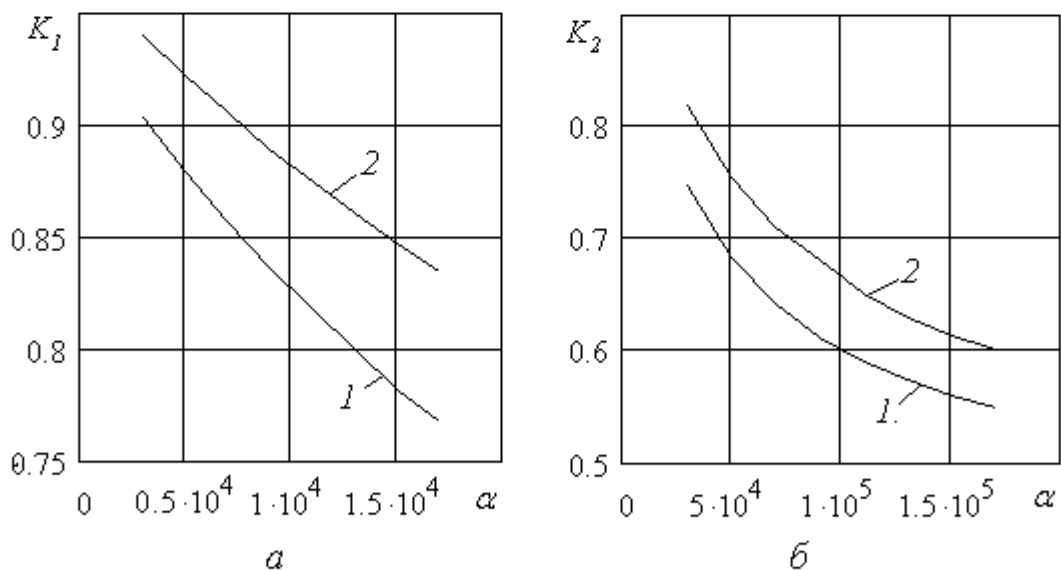


Рис.3. Графіки залежності коефіцієнта зниження температури різання від коефіцієнта тепловіддачі α , Вт/м^2 :

- а) полив вільно падаючим струменем охолоджуючого середовища;
- б) струйно-напірна подача охолоджуючого середовища

Приклад розрахунку температури різання методом кінцевих різностей приведений для чистової токарної обробки вала зі сталі 45 збірними різцями з механічним закріпленням твердосплавних пластин Т15К6 (геометричні параметри: головний кут в плані $\varphi = 45^\circ$, передній кут $\gamma = 0^\circ$, радіус при вершині $r = 1\text{ мм}$); шорсткість обробленої поверхні $R_a = 1,25\text{ мкм}$; температура охолоджуючого середовища $\Theta_o = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Графік 1 характеризує режими різання: швидкість $V_1 = 1,5\text{ м/с}$; подача $s_1 = 0,2\text{ мм/об}$; глибина $t = 1\text{ мм}$; графік 2 - швидкість $V_2 = 2,5\text{ м/с}$; подача $s_2 = 0,1\text{ мм/об}$; глибина $t = 1\text{ мм}$.

Розраховані значення температури різання без використання охолоджуючого середовища $\Theta_{s1} = 734\text{ }^\circ\text{C}$, $\Theta_{s2} = 1078\text{ }^\circ\text{C}$. З використанням охолоджуючого середовища температура різання значно зменшується. В залежності від способу подачі охолоджуючого середовища в зону різання змінюється коефіцієнт тепловіддачі, внаслідок чого і ефективність охолодження буде різною.

Аналіз графіків свідчить про те, що коефіцієнт зниження температури різання при струйно-напірній подачі охолоджуючого середовища внаслідок значно більших значень коефіцієнта тепловіддачі вище, ніж при поливі вільно падаючим струменем охолоджуючого середовища. З ростом температури різання коефіцієнт зниження температури зменшується.

Таким чином, виконані дослідження впливу способу подачі охолоджуючого середовища на тепловий стан леза ріжучого інструменту, встановлені кількісні зв'язки коефіцієнту тепловіддачі та температури різання, на підставі яких стає можливою розробка методів керування тепловими явищами в зоні обробки в умовах конвективного теплообміну.

Література.

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. - М.: Машиностроение, 1990. - 288с.
2. Ивченко Т.Г., Легашева Т.А., Сытник М.Н. Исследование температурного поля резцов, оснащенных минералокерамикой. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2000. Вып. 10. С.81- 86.
3. Ивченко Т.Г., Нечепавев В.Г., Бобьрь Н.А. Закономерности изменения коэффициента теплоотдачи элементов технологических систем в условиях конвективного теплообмена // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонГТУ, 2003. Вып. 24. - С.73-78.