УДК 621.9: 658.5

Полякова К.В., Вітохіна Д.В. науков. кер. Івченко Т.Г. (Україна, м. Донецьк, ДонНТУ)

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ДЕТАЛІ ТА ІНСТРУМЕНТУ ПІД ЧАС ФРЕЗЕРУВАННЯ

В результаті проведених досліджень розроблена методика аналітичного визначення температур в деталі та інструменті під час фрезерування з урахуванням уривчастого різання в умовах сталого теплообміну. Встановлений вплив співвідношення між тривалістю робочого і холостого ходів на температуру.

Тепловий стан деталі та інструменту суттєво впливає на працьоздатність різального інструменту та якість обробленої поверхні деталей машин, у зв'язку з чим зростає і актуальність задач по його дослідженню.

В наступний час досить добре розроблені методи досліджень теплового стану інструменту і деталі в умовах сталого теплообміну [1]. Відомі дослідження загальнотеоретичних закономірності опису теплофізичних явищ при несталому теплообміні [2], в тому складі для фрезерування [3], не враховують особливостей формування теплових потоків та стану деталі і вимагають подальшого розвитку.

Метою представленої роботи є розробка методики розрахунку температур в деталі та інструменті під час фрезерування.

Під час схематизації компонентів технологічної системи деталь розглядається як напівскінчений простір, лезо інструменту розглядається у вигляді необмеженого клина з кутом загострення β. Джерело теплоти, що виникає на передній поверхні леза інструмента, представляється двовимірним прямокутним з розмірами bxl (l - довжина контактної площадки стружки з передньою поверхнею леза в напрямку сходу стружки, b - ширина контактної площадки).

Температурне поле, що виникає в лезі ріжучого інструменту під дією двовимірного прямокутного джерела при несталому теплообміні, описується наступним чином [1]:

$$\Theta\ (x,y,z,\tau)=\frac{K_\beta q}{4\pi\lambda}\int_0^l dx_u \int_{-0,5b}^{0,5b}\frac{\left(1-erf\left[\sqrt{(x-x_u)^2+y^2+(z-z_u)^2}\Big/\sqrt{4\omega\tau}\right]\right)}{\sqrt{(x-x_u)^2+y^2+(z-z_u)^2}}dz_u\,, \quad (1)$$

де K_β - коефіцієнт переходу від необмеженого простору до необмеженого клина: $K_\beta = 4$ для $\beta = 90°$, $K_\beta = 6$ для $\beta = 60°$; q - щільність розподілу теплового потоку; λ – коефіцієнт теплопровідності; R - відстань від будь якої точки тіла $M(x, y, z)$ до місця спалаху джерела $J(x_u, y_u, z_u)$:

$R=\sqrt{(x-x_u)^2+(y-y_u)^2+(z-z_u)^2}$; $erf[u]=\left(2/\sqrt{\pi}\right)\int_0^u e^{-u^2}du$ – відома модифікована функція інтегралу вірогідності.

Розрахунки середньої температури леза досить складні, тому для подальшого аналізу теплового стану інструменту як основний його показник приймається температура характерної точки леза – його вершини (при $\psi = 0$, $\zeta = 0$, $\eta = 0$), яка представлена в безрозмірному вигляді:

$$T(F_o) = \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\left(1 - erf\left[\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^u} \Big/ 2\sqrt{F_o}\right]\right)}{\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^2}} d\zeta_u . \qquad (2)$$

де $\psi = x/l$, $\psi_u = x_u/l$, $\zeta = z/l$, $\zeta_u = z_u/l$, $\eta = y/l$ - безрозмірні координати; $\alpha = 0{,}5b/l$ - безрозмірна ширина перерізу; $F_o = \omega\tau / l^2$ - безрозмірний критерій часу, або критерій Фур′є.

Такий опис закону розподілу температур у безрозмірному вигляді дозволяє встановити загальні закономірності зміни температури, які для кожного конкретного варіанта обробки коректуються розмірним коефіцієнтом $P = K_\beta\, ql/4\pi\lambda$, а температурне поле $\Theta(x, y, z, \tau) = PT(\psi, \eta, \zeta, F_o)$.

Процес фрезерування характеризується наявністю робочих ходів тривалістю t_p, які чергуються з холостими ходами тривалістю t_p. В період робочого ходу відбувається нагрів інструменту, який описується наведеними раніше аналітичними залежностями. В період холостого ходу у відсутності нагріву відбувається охолодження ріжучих кромок за рахунок відведення тепла із зони різання углиб леза. Процес охолодження в цьому випадку описується наступним чином [1]:

$$\Theta_o(F_o) = \Theta(\infty)\exp\left[-0.04F_0\right]; \quad T_o = T(\infty)exp\left[-0.04F_o\right], \qquad (3)$$

де $\Theta(\infty)$, $T(\infty)$ – абсолютна та безрозмірна температури при сталому теплообміні.

Циклічний процес зміни температури вершини леза інструменту при уривчастому різанні, представлений на рис. 2, має аналітичний опис:

$$T_ц(\tau) = \begin{cases} T_{нi}(\tau), якщо \quad t_ц(i-1) \le \tau \le \left(t_p + t_ц i\right), \quad i = 1,2.....n; \\ T_{oi}(\tau), якщо \quad \left(t_p + t_ц(i-1)\right) \le \tau \le t_ц i. \end{cases}$$

$$T_{нi}(\tau) = \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\left(1 - erf\left[\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^u} \Big/ 2\sqrt{\omega_o\left(\tau - \left(t_p + \Delta t_{i-1}\right)\right)}\right]\right)}{\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^2}} d\zeta_u ; \qquad (4)$$

$$T_{oi}(\tau) = T_{нi}(t_p + \Delta t_{i-1})exp\left[-0.04\omega_o\left(\tau - t_p\right)\right]; \qquad \Delta t_{i-1} = 0 ,$$

де $\omega_o = \omega / l^2$; $t_ц$ - тривалість циклу: $t_ц = t_p + t_x$; $\Delta\tau_i$ - період часу, що коректує початок відліку температури нагріву $T_{н(i+1)}(t_p + t_ц i + \Delta\tau_i)$ в кожному наступному циклі з обліком охолодження в передуючому $T_{oi}(t_ц i)$: для кожного циклу $\Delta\tau_i = x_i$ розраховується чисельними методами як корінь рівняння:

$$\int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\left(1 - erf\left[\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^u} \Big/ 2\sqrt{\omega_o\left(t_p + x_i\right)}\right]\right)}{\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^2}} d\zeta_u = T_{нi}(t_p + \Delta t_{i-1})exp\left[-0.04\omega_o(\tau_h)\right].$$

Графіки на рис. 1 побудовані для обробки фрезами з твердосплавними пластинами Т15К6 (коефіцієнт температуропровідності $\omega = 0{,}100 \cdot 10^{-4}$ м^2/с) в умовах, що забезпечують розміри контактної площадки стружки з передньою поверхнею леза l = 1мм, b = 2мм, тривалість робочого ходу t_p = 0,2с, холостого t_x = 0,4с.

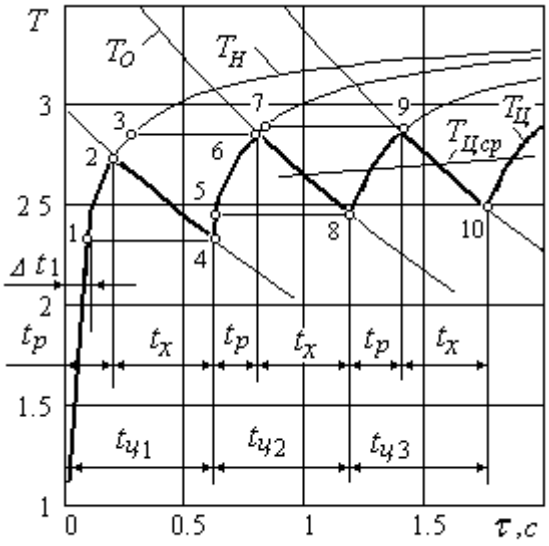

Рис 1. Графіки зміни безрозмірної температури вершини леза фрези

У першому циклі $t_{ц1}$ в початковий момент часу спостерігається різке зростання температури протягом першого робочого ходу t_p до точки 2 ($T_{н1}(t_p)$ = 2,75) на кривій нагріву T_H, а потім протягом холостого ходу t_x відбувається охолодження до точки 4 ($T_{о1}(t_ц)$ = 2,34) на кривій охолодження T_O. Розраховане значення $\Delta\tau_1$ = 0,08. У наступному циклі $t_{ц2}$ нагрів в період робочого ходу t_p походить від точки 4 до точки 6 ($T_{н2}(t_p + t_ц)$ = 2,86) по кривій, відповідній ділянці 1-3 кривої нагріву T_H, потім знов відбувається охолодження до точки 8 ($T_{о2}(2t_ц)$ = 2,44). Розраховане значення $\Delta\tau_2$ = 0,617. Наступний цикл $t_{ц3}$ починається в точці 8, нагрів протягом робочого ходу t_p відбувається по кривій 8-9 ($T_{н3}(t_p + 2t_ц)$ = 2,88), відповідній ділянці 5-7, охолодження закінчується в крапці 10 ($T_{о3}(3t_ц)$ = 2,45), потім процес знов повторюється. Розраховане значення $\Delta\tau 3_1$ = 1,203 свідчить про те, що з погрішністю 0,3% процес стабілізується - нагрів і охолодження врівноважуються, і може вважатися сталим.

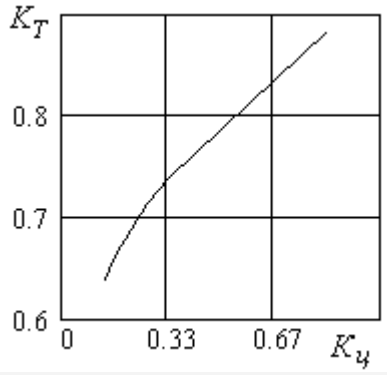

Рис. 2. Графіки коефіцієнтів зниження рівня температур під час уривчастого різання в порівнянні з безперервним

Середній рівень температури, досягнутої при сталому уривчастому різанні $T_{Цср}$ нижче, ніж при безперервному $T(\infty)$, що може бути порівняно за допомогою наступного коефіцієнта: $K_T = T_{Цср}/T(\infty)$.

Графіки залежності коефіцієнтів зниження рівня температур при уривчастому різанні в порівнянні з безперервним K_T від співвідношень робочих і холостих ходів наведені на рис. 2 (тривалість циклу постійна $t_ц$ = const, зміна тривалості робочого ходу характеризується коефіцієнтом $K_ц = t_p/t_ц$). Прийнято, що $T(\infty) \cong T(100) \cong 3{,}5$.

Джерело теплоти на поверхні деталі представляється смуговим швидкорухомим з розміром L, який визначається довжиною контакта деталі з лезом інструменту в межах зносу по його задній поверхні h ($L = h$).

Температурне поле в деталі для швидкорухомого смугового джерела описується аналітичним виразом [1]:

$$\Theta(x,y)=\frac{q\sqrt{\omega_\partial}}{2\lambda_\partial\sqrt{\pi V}}\int_0^p\frac{f(x_u)dx_u}{\sqrt{x-x_u}}\exp\left(-\frac{Vy^2}{4\omega_\partial(x-x_u)}\right)=P_oT(\psi,\nu), \qquad (5)$$

де $P_o=ql/\lambda_\partial\sqrt{\pi Pe}$ - розмірний коефіцієнт; $Pe = Vl/\omega_\partial$ - критерій Пеклє.

Розподіл безрозмірних температур у поверхневому шарі деталі:

$$T(\psi,\nu)=\frac{1}{2}\int_0^\Delta\frac{f(\psi_u)d\psi_u}{\sqrt{\psi-\psi_u}}\exp\left(-\frac{Pe}{4}\cdot\frac{\nu^2}{\psi-\psi_u}\right), \qquad (6)$$

де $f_1(\psi_u)=1$, $f(\psi_u)=\exp\left[-k_0(\psi_u)^2\right]$ - рівномірна та нормальна несиметрична функції розподілу щільності теплових потоків.

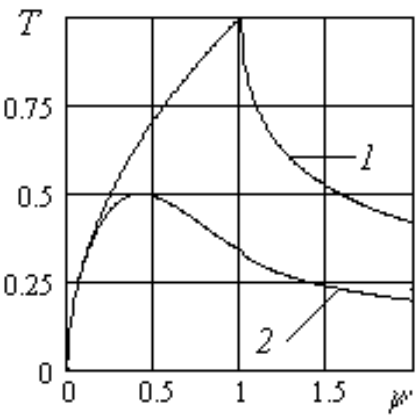

Рис. 3. Розподіл безрозмірних температур на поверхні деталі

Розподіл безрозмірних температур на поверхні деталі для рівномірного (крива 1) та нормального (крива 2) законів розподілу щільності теплових потоків $T(\psi)$ (координата ν=0):

$$T(\psi)=\frac{1}{2}\int_0^\Delta\frac{f(\psi_u)d\psi_u}{\sqrt{\psi-\psi_u}}; \qquad (7)$$

Максимальне значення безрозмірних $T_{1\max}$ і $T_{2\max}$ та розмірної температур $\Theta_{\max}$ з урахуванням їх координат згідно з рис. 3: $T_{2max}(0.5,0) = 0.5$; $T_{1max}(1,0) = 1$; $\Theta_{\max} = P_o\, T_{\max}$.

Розроблена методика дозволяє розраховувати температуру в будь який точці деталі.

ВИСНОВКИ

Таким чином, в результаті проведених досліджень розроблена методика аналітичного визначення температур в деталі та інструменті під час фрезерування з урахуванням уривчастого різання в умовах сталого теплообміну. Встановлений вплив співвідношення між тривалістю робочого і холостого ходів на температуру, що дає оцінку зниження температури інструменту під час уривчастого різання порівняно з безперервним для різних умов обробки.

ЛІТЕРАТУРА.

1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах / А.Н. Резников, Л.А. Резников. - М.: Машиностроение, 1990. –288с.

2. Івченко Т.Г. Дослідження теплового стану ріжучого інструменту в умовах нестаціонарного різання / Т.Г. Івченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. - Донецьк, ДонНТУ, 2006.- Випуск 110.- С.17-23.

3. Ивченко Т.Г. Теоретические исследования теплового состояния торцовых фрез / Т.Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА, 2006. - Вип.19. - С.33-39.