

УДК 621.9: 658.5

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО РІЗАННЯ

Івченко Т.Г.

(ДонНТУ, з. Донецьк, Україна)

Ефективна експлуатація різального інструменту значною мірою визначається його тепловим станом. Сучасні тенденції росту продуктивності за рахунок підвищення режимів механічної обробки, зокрема застосування високошвидкісного різання, приводять до істотного збільшення теплових навантажень на різучий інструмент, у зв'язку з чим зростає і актуальність задач по їх дослідженню.

Сьогодні досить добре розроблені методи як експериментальних, так і теоретичних досліджень теплового стану різального інструменту в умовах сталого теплообміну [1, 2, 3]. Для більшості випадків механооброблення це цілком виправдано, оскільки період несталого теплообміну вельми малий і їм можна нехтувати. Проте у ряді випадків при короткочасному або уривчастому різанні, нестационарністю процесу нехтувати не можна. Для різального інструменту подібні дослідження практично відсутні. Відомі загальнотеоретичні закономірності опису теплофізичних явищ при несталому теплообміні не враховують особливостей функціонування різучого інструменту і вимагають істотного уточнення.

Метою представленої роботи є розробка методики розрахунку температури різучого інструменту в умовах нестационарного різання, а також аналітичні дослідження на її підставі впливу умов обробки на його тепловий стан.

Для теоретичного опису трьохмірного нестационарного температурного поля використовується диференціальне рівняння теплопровідності [1]:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} = \omega \frac{\partial \theta}{\partial \tau},$$

де θ , x , y , z , τ – температура, координати точок тіла і час, ω – коефіцієнт теплопровідності.

Згідно з методом джерел теплоти відоме рішення диференціальне рівняння теплопровідності для точечного джерела, безперервно діючого в необмеженому просторі [1]:

$$\theta(x, y, z, \tau) = \frac{q}{4\pi\lambda R} \left(1 - \operatorname{erf} \left[\frac{R}{\sqrt{4\omega\tau}} \right] \right),$$

де $R = \sqrt{(x - x_u)^2 + (y - y_u)^2 + (z - z_u)^2}$ – відстань від будь якої точки тіла $M(x, y, z)$ до місця спалаху точечного джерела $J(x_u, y_u, z_u)$; q – щільність розподілу теплового потоку; λ – коефіцієнт теплопровідності; $\operatorname{erf}[u]$ – відома модифікована функція інтегралу вірогідності:

$$\operatorname{erf}[u] = \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \right) \int_0^u e^{-u^2} du.$$

Під час схематизації компонентів технологічної системи лезовий різучий інструмент розглядається у вигляді необмеженого клина з кутом загострення β . Джерело теплоти, що виникає на передній поверхні леза інструмента, представляється двовимірним прямокутним з розмірами $b \times l$ (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 такого джерела при несталому теплообміні, описується наступним чином:

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

де K_β – коефіцієнт переходу від необмеженого простору до необмеженого клина: $K_\beta = 4$ для $\beta = 90^\circ$, $K_\beta = 6$ для $\beta = 60^\circ$.

Вважається доцільним використання закону розподілу температур $T(\psi, \eta, \zeta, F_o)$ у безрозмірному вигляді:

$$T(\psi, \eta, \zeta, F_o) = \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\left(1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}}{2\sqrt{F_o}}\right]\right)}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \eta^2 + (\zeta - \zeta_u)^2}} d\zeta_u,$$

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 $\Theta(x, y, z, \tau) = PT(\psi, \eta, \zeta, F_o)$.

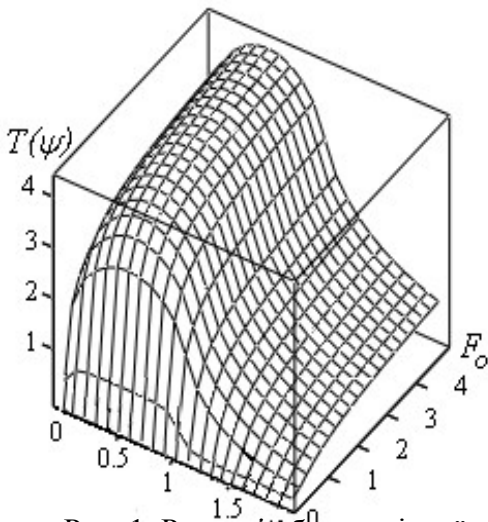


Рис. 1. Розподіл безрозмірної температури по головній ріжучій крайці леза інструменту $T(\psi)$ з обліком F_o .

Загальний вигляд безрозмірного розподілу температур по головній ріжучій крайці леза інструменту з обліком безрозмірного критерію часу F_o наведений на рис.1 (при $\zeta = 0$, $\eta = 0$, $b = 2l$):

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

В початковий момент часу $t = 0$ та $F_o = 0$ температура в кожній точці крайки $T = 0$, а далі вона поступово зростає.

З обліком встановленого закону розподілу температур в кожний момент часу t може бути розрахована безрозмірна середня температура на головній ріжучій крайці леза інструменту $T_{cp}(t)$:

$$T_{cp}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t d\tau \frac{1}{l} \int_0^l d\psi \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \frac{\left(1 - \operatorname{erf}\left[\frac{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + \zeta_u^2}}{2\sqrt{F_o(\tau)}}\right]\right)}{\sqrt{(\psi - \psi_u)^2 + (\zeta_u)^2}} d\zeta_u.$$

Середня температура розраховується з обліком розмірного коефіцієнта P : $\Theta_{cp}(t) = PT_{cp}(t)$. Враховуючи, що розрахунки середньої температури досить складні, для

подальшого аналізу теплового стану ріжучого інструменту як основний його показник приймається температура характерної точки леза – його вершини (при $\psi = 0, \zeta = 0, \eta = 0$):

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

На рис.2 наведений графік залежності безрозмірної температури вершини леза ріжучого інструменту від критерія безрозмірного часу – критерія Фур'є (при $b = 2l$).

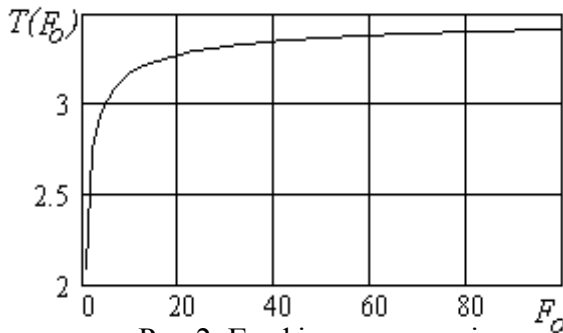


Рис.2. Графік залежності безрозмірної температури вершини леза $T(F_o)$ від критерія Фур'є

На підставі аналізу параметрів, що входять до критерію Фур'є, встановлений діапазон його зміни стосовно ріжучого інструменту для моменту часу від $t = 0,1$ с до $t = 10$ с знаходиться в межах від 1 до 100 (коефіцієнти температуропровідності інструментальних матеріалів змінюються в межах від $\omega = 0 \cdot 10,054^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ для інструментальних сталей до $\omega = 0,246 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ для твердих сплавів; довжина контакту стружки з передньою поверхнею змінюється в межах від $l = 0,5$ мм до $l = 3$ мм). Процес різання вважається сталим

при $F_o \geq 100$ [1].

Найбільший інтерес з погляду нестационарного різання представляє уривчасте різання, що характеризується наявністю робочих ходів тривалістю t_p , які чергуються з холостими ходами тривалістю t_r . Прикладами таких процесів може бути стругання, фрезерування, шліфування кругами з переривистою поверхнею. В період робочого ходу відбувається нагрів інструменту, який описується наведеними раніше аналітичними залежностями. В період холостого ходу у відсутності нагріву відбувається охолодження різальних кромки за рахунок відведення тепла із зони різання углиб леза. Процес охолодження в цьому випадку описується наступним чином [1]:

$$\Theta_o(F_o) = \Theta(\infty) \exp[-0.04F_o]; \quad T_o = T(\infty) \exp[-0.04F_o],$$

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. 3, має аналітичний опис:

$$T_{\psi} | t | : \begin{cases} T_{ni}(t), \text{ якщо } t_{\psi} | i-1 | \leq t \leq t_p + t_{\psi} | i |, & i: 1, 2, \dots, n; \\ T_{oi}(t), \text{ якщо } t_p + t_{\psi} | i-1 | \leq t \leq t_{\psi} | i |. \end{cases}$$

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

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

де $\omega_o = \omega/l^2$; t_u – тривалість циклу: $t_u = t_p + t_x$; $\Delta\tau_i$ – період часу, що коректує початок відліку температури нагріву $T_{n(i+1)}(t_p + t_u i + \Delta\tau_i)$ в кожному наступному циклі з обліком охолодження в передуючому $T_{oi}(t_u i)$.

Для кожного циклу $\Delta\tau_i = x_i$ розраховується чисельними методами як корінь рівняння:

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

Розрахунки та побудова графіків на рис. 3 виконані з використанням Mathcad Professional 2001 стосовно до обробки інструментами з твердосплавними пластинами T15-K6 (коефіцієнт температуропровідності $\omega = 0,100 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$) для умов обробки, що забезпечують розміри контактної площадки стружки з передньою поверхнею леза $l = 1 \text{ мм}$, $b = 2 \text{ мм}$, тривалість робочого ходу $t_p = 0,2 \text{ с}$, холостого $t_x = 0,4 \text{ с}$.

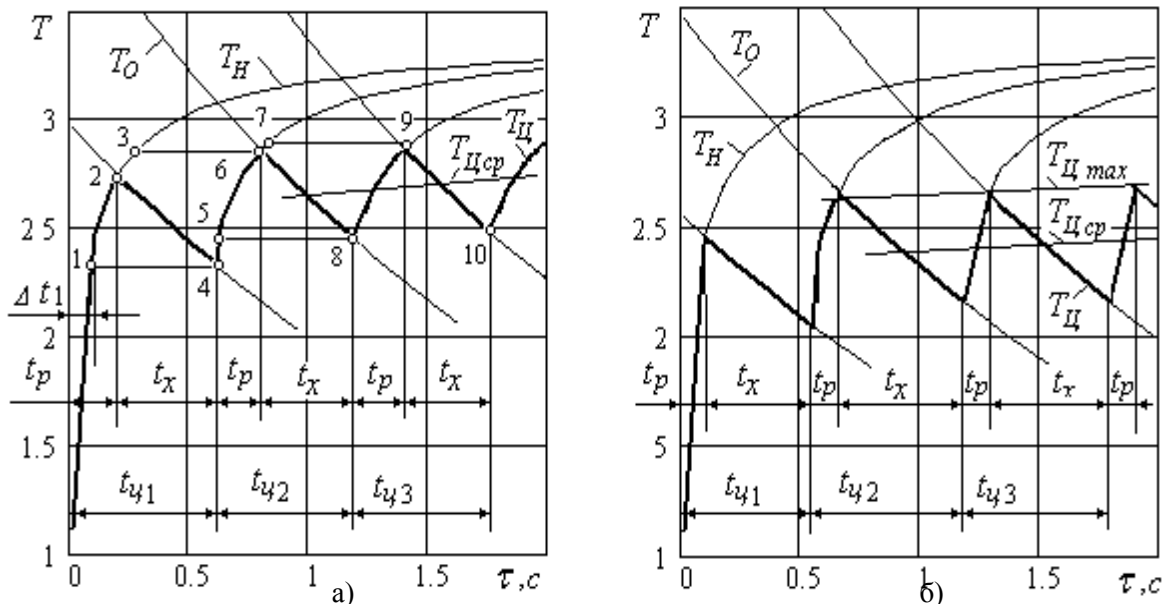


Рис 3. Графіки зміни безрозмірної температури вершини леза інструменту T під час уривчастого різання

У першому циклі t_{u1} в початковий момент часу спостерігається різке зростання температури протягом першого робочого ходу t_p до точки 2 ($T_{n1}(t_p) = 2,75$) на кривій нагріву T_H , а потім протягом холостого ходу t_x відбувається охолодження до точки 4 ($T_{o1}(t_u) = 2,34$) на кривій охолодження T_O . Розраховане значення $\Delta\tau_1 = 0,08$. У наступному циклі t_{u2} нагрів в період робочого ходу t_p походить від точки 4 до точки 6 ($T_{n2}(t_p + t_u) = 2,86$) по кривій, відповідній ділянці 1-3 кривої нагріву T_H , потім знов відбувається охолодження до точки 8 ($T_{o2}(2t_u) = 2,44$). Розраховане значення $\Delta\tau_2 = 0,617$. Наступний цикл t_{u3} починається в точці 8, нагрів протягом робочого ходу t_p відбувається по кривій 8-9 ($T_{n3}(t_p + 2t_u) = 2,88$), відповідній ділянці 5-7, охолодження закінчується в точці 10 ($T_{o3}(3t_u) = 2,45$), потім процес знов повторюється. Розраховане значення $\Delta\tau_3 = 1,203$ свідчить про те, що з погрішністю 0,3% процес стабілізується – нагрів і охолодження врівноважуються, і може вважатися сталим.

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

$$K_T = T_{Цср} / T(\infty).$$

Враховуючи, що при $F_o \geq 100$ процес різання вважається сталим, розраховуємо $T(\infty) \cong T(100) \cong 3,5$.

У тому випадку, коли змінюється співвідношення між тривалістю робочого і холостого ходів, середній рівень температури, що досягається, також змінюється. Як свідчать графіки, які представлені на рис. 3 б, що в порівнянні з графіками рис. 3 а, при незмінній тривалості циклу із зменшенням тривалості робочого ходу t_p в 2 рази, максимальний $T_{Цmax}$ і середній $T_{Цср}$ рівні температур знижуються майже на 20%.

З використанням зазначеної методики виконані розрахунки коефіцієнтів зниження рівня температур при уривчастому різанні в порівнянні з безперервним K_T для різних співвідношень робочих і холостих ходів, результати яких наведені на рис. 4.

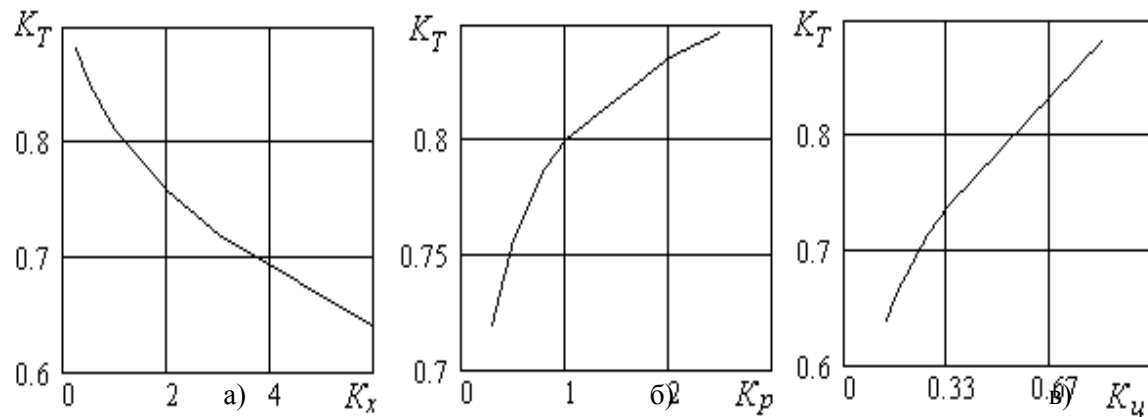


Рис.4. Графіки коефіцієнтів зниження рівня температур під час уривчастого різання в порівнянні з безперервним K_T для різних співвідношень робочих і холостих ходів

Розглянуті наступні випадки циклічної обробки:

- тривалість робочого ходу постійна $t_p = \text{const}$, зміна тривалості холостого ходу характеризується коефіцієнтом $K_x = t_x / t_p$ (рис.4 а);
- тривалість холостого ходу постійна $t_x = \text{const}$, зміна тривалості робочого ходу характеризується коефіцієнтом $K_p = t_p / t_x$ (рис.4 б);
- тривалість циклу постійна $t_u = \text{const}$, зміна тривалості робочого ходу характеризується коефіцієнтом $K_u = t_p / t_u$, (рис. 4 в).

На підставі наведених графіків може бути виконана кількісна оцінка ефективності підвищення тривалості холостих ходів та зменшення робочих, що приводить до суттєвого зниження рівня температури ріжучого інструменту. Отримані результати дають можливість прогнозувати зміну температури в залежності від співвідношень робочих і холостих ходів під час уривчастого різання, а також керувати зниженням температури за рахунок вибору раціонального рівня цих співвідношень.

З використанням методики визначення безрозмірної температури може бути виконаний аналіз температури ріжучого інструменту в різних умовах експлуатації на підставі визначення для цих умов розмірного коефіцієнту P , засоби розрахунку якого достатньо відомі [2, 3].

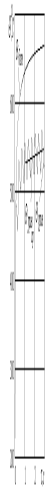


Рис. 5. Графіки зміни температури вершини леза стругального різця при уривчастому різанні $\Theta_{урив}$ в порівнянні з безперервним різанням $\Theta_{безп}$

співвідношення робочих і холостих ходів $t/t_x = 0,5$ (рис. 4), з обліком того, що $\Theta(\infty) = PT(\infty) = 735^\circ\text{C}$, середня температура вершини леза стругального різця при уривчастому різанні $\Theta_{цр} = 550^\circ\text{C}$. Досить високий збіг отриманих результатів визначення температури свідчить про можливість використання коефіцієнтів зниження рівня температур K_T для оцінки теплового стану ріжучого інструменту при уривчастому різанні порівняно з безперервним.

Таким чином з використанням методу джерел теплоти розроблена методика аналітичного розрахунку температури ріжучого інструменту в умовах нестационарного різання, що дозволяє прогнозувати миттєву температуру в будь-якій точці леза інструменту під час уривчастого різання. Виконані на її підставі аналітичні дослідження дають оцінку зниження температури інструменту під час уривчастого різання порівняно з безперервним для різних умов обробки.

Пропонована методика може бути широко використана для прогнозування і дослідження теплового стану різних ріжучих інструментів в умовах нестационарного різання.

Перелік літератури: 1. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с. 2. Івченко Т.Г. Аналітичне визначення температури різання в залежності від умов експлуатації ріжучого інструменту // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 92. – Донецьк, ДонНТУ, 2005. – С. 37-42. 3. Tatjana Ivchenko. Research of thermal processes and control of temperature of cutting at exploitation of a modular cutting tool // PROCEEDINGS OF THE 4-TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGIES ICAMAT 2005: Bucuresti / 3-4 noiembrie 2005 / ed.: Aurelian Vlase. Bucuresti: Editura Academiei Romane; 2005. – p. 507-512.

Приклад розрахунку наведений для обробки конструкційної сталі 45 стругальними різцями із твердосплавними пластинами Т15К6 з режимами різання: глибина $t = 1,5\text{мм}$, подача $s = 0,2\text{ мм/под. хід}$, швидкість різання $v = 47\text{ м/хв}$, які забезпечують розміри контактної площадки стружки з передньою поверхнею леза $l = 0,9\text{ мм}$, $b = 2,1\text{ мм}$, тривалість робочого ходу $t_p = 0,1\text{ с}$, холостого $t_x = 0,2\text{ с}$. Щільність рівномірно розподіленого теплового потоку $q = 2 \cdot 10^7\text{ Вт/м}^2$, розмірний коефіцієнт $P = 210^\circ\text{C}$.

Графіки зміни температури вершини леза стругального різця при уривчастому різанні $\Theta_{урив}$ в порівнянні з безперервним різанням $\Theta_{безп}$ наведені на рис. 5. Визначена середня температура вершини леза стругального різця при уривчастому різанні $\Theta_{урив\text{ ср}} = 545^\circ\text{C}$.

Розрахована за допомогою коефіцієнта зниження рівня температур $K_T = 0,75$ для

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ
В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНОГО РІЗАННЯ

Івченко Т.Г.

З використанням методу джерел теплоти розроблена методика аналітичного розрахунку температури різучого інструменту в умовах нестационарного різання, що дозволяє прогнозувати миттєву температуру в будь-якій точці леза інструменту під час уривчастого різання. Виконані на її підставі аналітичні дослідження дають оцінку зниження температури інструменту під час уривчастого різання порівняно з безперервним для різних умов обробки.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОГО РЕЗАНИЯ

Ивченко Т.Г.

С использованием метода источников теплоты разработана методика аналитического расчета температуры режущего инструмента в условиях нестационарного резания, позволяющую прогнозировать мгновенную температуру в любой точке лезвия инструмента при прерывистом резании. Выполненные на ее основании аналитические исследования дают оценку снижения температуры инструмента при прерывистом резании в сравнении с непрерывным для различных условий обработки.

RESEARCH OF THE CUTTING TOOL WARMTH STATE
IN THE CONDITIONS OF NON-STATIONARY CUTTING

Ivchenko T.G.

With the use of method of the warmth sources the technique of analytical calculation of the cutting tool temperature in the non-stationary cutting conditions is developed, which allow forecasting an instantaneous temperature in any point of the instrument blade at the irregular cutting. Analytical researches are executed on its foundation give the estimation of decline of the cutting tool temperature at the irregular cutting comparatively with continuous for the different terms of treatment.

Рецензент: д.т.н., проф. Матюха П.Г.