

УДК 621.9: 658.5

Т.Г. Івченко, канд. техн. наук, доцент

ДВНЗ Донецький національний технічний університет, м. Донецьк, Україна

Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@mech.dgtu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgtu.donetsk.ua)

## УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ АНАЛІТИЧНОГО РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ

*Виконаний аналіз закономірностей формування теплових потоків та температур різання в залежності від параметрів процесу фрезерування. Розроблена удосконалена методика розрахунку температури різання під час фрезерування з урахуванням уривчастості процесу різання в умовах несталого теплообміну, яка підтверджена експериментально.*

**Ключові слова:** тепловий потік, температура, несталий процес, фрезерування.

### 1. Вступ

Одним з параметрів процесу механічної обробки, що суттєво обмежує продуктивність та якість поверхневого шару деталей машин являється висока температура в зоні різання. У цьому зв'язку вельми актуальні виконані дослідження по визначенню температур різання під час торцевого фрезерування – одного з найбільш поширених методів обробки плоских поверхонь.

В наступний час ряд виконаний ряд досліджень теплового стану ріжучого інструменту в умовах нестационарного різання [1] та загальних закономірностей формування температур в інструменті під час фрезерування [2] на підставі подання законів розподілу температур у безрозмірному вигляді, без урахування складного характеру змін теплових потоків для несталого теплообміну. Подальший розвиток досліджень направлений на розробку методики розрахунку теплових потоків в умовах несталого теплообміну [3]. В них виконаний аналіз закономірностей формування теплових потоків і особливостей їх впливу на розподіл в часі температур різання в залежності від параметрів обробки для безперервного різання. Питання, пов'язані з розрахунками температури різання для уривчастого різання, розглянуті в [4, 5], дають можливість теоретичного визначення температур різання під час фрезерування, однак, потребують розширення досліджень в цьому напрямку.

Мета роботи – удосконалення методики аналітичного розрахунку температур різання під час фрезерування з урахуванням уривчастості процесу різання в умовах несталого теплообміну.

### 2. Основний зміст і результати роботи

Температура різання в умовах несталого теплообміну  $\Theta$  може бути визначена як середня температура на передній  $\Theta_{nn}$  та задній  $\Theta_{zn}$  поверхнях леза з урахуванням функції безрозмірного часу  $m(Fo)$ :

$$\Theta = \frac{(\Theta_{nn}l + \Theta_{zn}h)m(Fo)}{l + h} = \frac{[q_1l(M_1l + N_1h) + q_2h(M_2h + N_1l)]m(Fo)}{(l + h)\lambda_u}, \quad (1)$$

де  $l$  - довжина контактної площадки між стружкою і передньою поверхнею леза зуба фрези;  $h$  - знос по задній поверхні леза;  $q_1$  і  $q_2$  - щільність теплових потоків на передній і задній поверхнях леза;  $M_{1,2}$ ,  $N_{1,2}$  - безрозмірні функції, що визначають нагрів площадок

на передній і задній поверхнях леза:  $M_{1,2} = (4,88 + 2,64\eta_{1,2}^{0,5} \lg \eta_{1,2})\beta^{-0,85}$ ;  $N_{1,2} = (0,04 + 0,02\eta_{1,2}^{0,6} \lg \eta_{1,2})B_{1,2}(h/l)$ ;  $\eta$  – безрозмірна ширина зрізу:  $\eta_1 = b/l$ ,  $\eta_2 = b/h$ ;  $b$  – ширина зрізу;  $\beta$  – кут загострення;  $\lambda_u$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу інструменту.

Схема для визначення основних параметрів процесу торцевого фрезерування наведена на рис. 1.

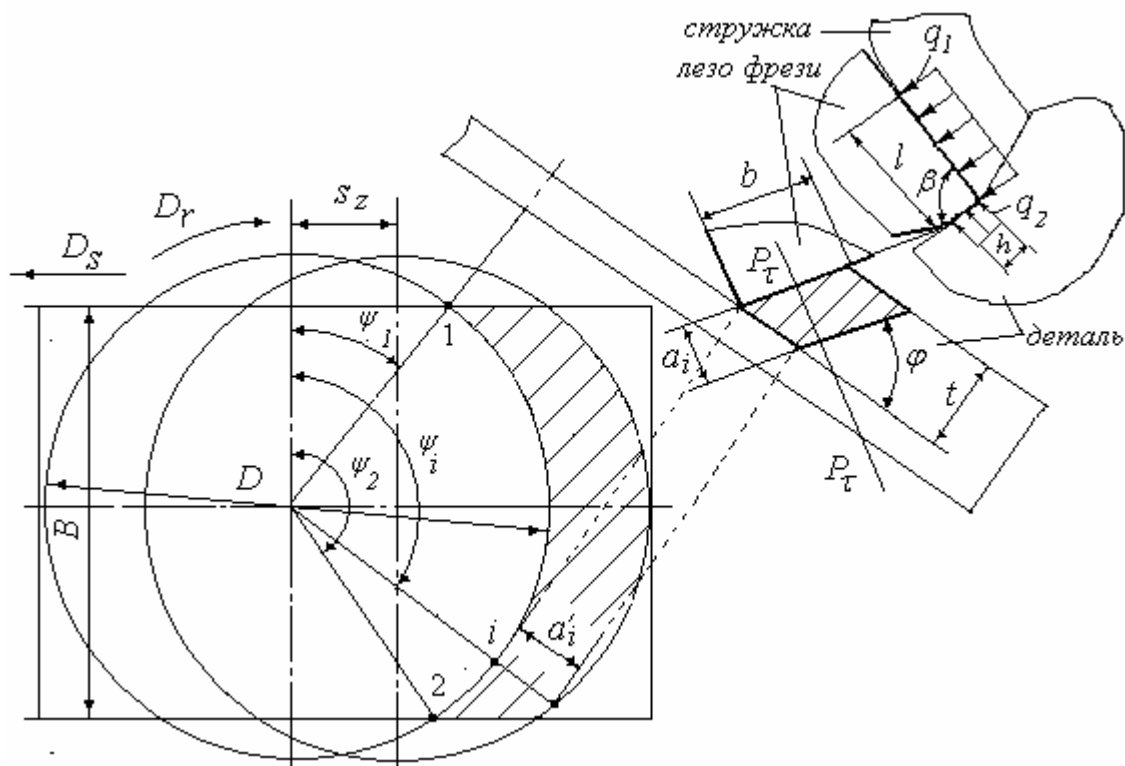


Рис. 1. Схема для визначення основних параметрів процесу торцевого фрезерування

Джерела теплоти, що виникають на передній і задній поверхнях леза фрези - двовимірні прямокутні з розмірами  $b \times l$  та  $b \times h$  і рівномірними розподілами щільностей тепловиділення  $q_1$  і  $q_2$  [4] ( $\psi_i$  – миттєвий кут повороту леза фрези;  $\psi_1, \psi_2$  - кути повороту на вході та виході контакту леза та деталі;  $P_\tau$  – головна січна площина)

Уривчастий процес різання при фрезеруванні характеризується наявністю робочих ходів тривалістю  $t_p$  та холостих ходів тривалістю  $t_x$ , які в сумі визначають тривалість циклу  $t_o = t_p + t_x$ , і визначаються:

$$t_o = 60/n, \quad t_p = 60 \arcsin(B/D)/\pi n, \quad t_x = K t_p, \quad K = (\pi/\arcsin(B/D) - 1), \quad (2)$$

де  $n$  – частота обертання;  $B$  – ширина фрезерування;  $D$  – діаметр фрези;  $K = t_x/t_p$  - співвідношення тривалостей холостих та робочих ходів.

Змінність у часі товщини зрізу  $a_i = a(\tau)$  спричиняє змінність у часі довжини контакту стружки з передньою поверхнею леза  $l(\tau)$ :

$$a(\tau) = s_z \sin \varphi \sin((\pi n \tau / 30) + \arccos(B/D)); \quad l(\tau) = 2a(\tau)[k(1 - \tan \gamma) + \sec \gamma], \quad (3)$$

де  $s_z$  – подача на зуб фрези;  $k$  – коефіцієнт усадки стружки;  $\varphi$  – головний кут у плані;  $\gamma$  – передній кут леза фрези.

Аналіз стаціонарності теплових процесів виконується на підставі безрозмірного критерія часу, або критерія Фур'є:  $F_o = \omega\tau / l^2$  ( $\omega$  – коефіцієнт теплопроводності леза інструменту;  $\tau$  – реальний час різання;  $l$  – довжина джерела теплоти). Функція безрозмірного часу  $m(F_o)$  може бути визначена наступним чином [4]:

$$m(F_o) = \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^u}}{2\sqrt{F_o}} \right] \right) d\zeta_u / \sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^2} / T(\infty), \quad (3)$$

де  $\psi_u = x_u/l$ ,  $\zeta_u = z_u/l$ , – безрозмірні координати;  $\alpha = 0,5b/l$  – безрозмірна ширина зрізу.

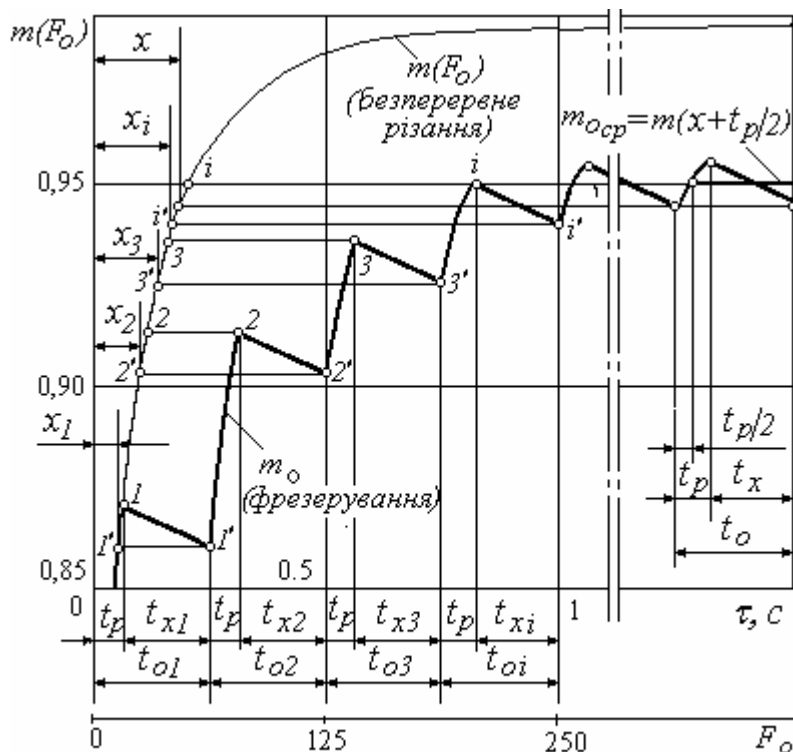


Рис. 2. Графік зміни в часі температури різання під час фрезерування в умовах несталого теплообміну

час фрезерування аналітично може бути описаний наступним чином:

$$m_o(\tau) = \begin{cases} m(\tau - i\tau_o + x_i), & \text{якщо } t_o(i-1) \leq \tau \leq (t_p + t_o i), \quad i = 1, 2, \dots, n_o \\ m(\tau_p + x_i) \exp[-0,04(\tau - \tau_p)], & \text{якщо } (t_p + t_o(i-1)) \leq \tau \leq t_o i \end{cases}, \quad (4)$$

де  $m(\tau - i\tau_o + x_i)$  – функція безрозмірного часу при нагріванні в період робочого ходу;  $m(\tau_p + x_i) \exp[-0,04(\tau - \tau_p)]$  – функція безрозмірного часу при охолодженні в період холостого ходу;  $n_o$  – число циклів;  $x_i$  – період часу, що коректує початок відліку температури нагріву в кожному наступному циклі з обліком охолодження в попередньому.

Для кожного циклу  $x_i$  розраховується чисельними методами як корінь рівняння:

$$m(x_i) = m(\tau_p + x_{i-1}) \exp[-0,04(\tau_x)]. \quad (5)$$

Графік циклічного процесу зміни в часі (реальному  $\tau, c$  та безрозмірному  $F_o$ ) функції безрозмірного часу  $m_o$  під час фрезерування в умовах несталого теплообміну наведені на рис. 4. Графіки побудовані для торцевих фрез діаметром  $D = 125$  мм, ширина фрезерування  $B = 85$ , число зубів фрези  $z = 8$ , що забезпечують тривалість робочого ходу  $t_p = 0,06$  с, холостого  $t_x = 0,19$  с, тривалість циклу  $t_o = 0,25$  с.

В початковий момент  $\tau = 0$  та  $F_o = 0$  під час несталого теплообміну функція безрозмірного часу дорівнює нулю. У першому циклі  $t_{o1}$  спостерігається різке зростання функції безрозмірного часу протягом першого робочого ходу  $t_p$  за рахунок нагріву до точки 1, а потім протягом холостого ходу  $t_x$  відбувається її зниження за рахунок охолодження до точки 1'. Розраховане значення  $x_1 = 0,053$  с. У наступному циклі  $t_{o2}$  нагрів в період робочого ходу  $t_p$  походить від точки 1' до точки 2, потім знов відбувається охолодження до точки 2'. Розраховане значення  $x_2 = 0,098$  с. Наступний цикл  $t_{o3}$  починається в точці 2', нагрів протягом робочого ходу  $t_p$  відбувається до точки 3, охолодження закінчується в точці 3'. Розраховане значення  $x_3 = 0,136$  с. Потім процес багаторазово повторюється, поступово нагрів і охолодження врівноважуються, процес стабілізується і може вважатися сталим для такого значення  $x$ , яке забезпечує однакове підвищення функції безрозмірного часу  $m_o$  протягом робочого ходу та її зменшення під час охолодження протягом холостого ходу. Значення  $x$  розраховується чисельним методом як корінь рівняння:

$$\int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^u}}{2\sqrt{\omega_o x}} \right] \right) d\zeta_u / \sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^2} / T(\infty) = \int_0^1 d\psi_u \int_{-\alpha}^{\alpha} \left( 1 - \operatorname{erf} \left[ \frac{\sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^u}}{2\sqrt{\omega_o (t_p + x)}} \right] \right) d\zeta_u \exp[-0.04\omega_o K t_p] / \sqrt{\psi_u^2 + \zeta_u^2} / T(\infty) \quad (6)$$

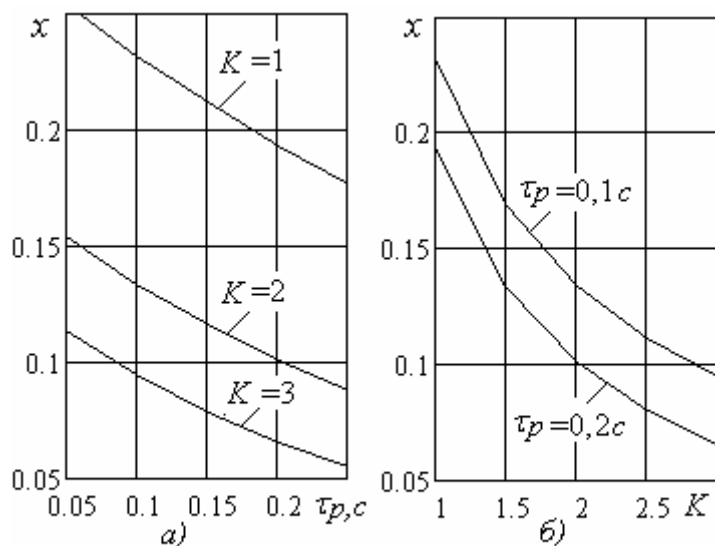


Рис. 3. Графіки залежності параметра  $x$  від тривалості робочого ходу  $\tau_p$  - а) та співвідношення тривалості холостих та робочих ходів - б)

Графіки залежності параметра  $x$  (кореня рівняння (6)) від тривалості робочого ходу  $\tau_p$  та співвідношення тривалості холостих  $\tau_x$  та робочих ходів  $\tau_p$ :  $K = t_x/t_p$  наведені на рис. 3. Значення параметра  $x$  зменшуються з ростом тривалості робочого ходу та співвідношення тривалості холостих та робочих ходів.

Середня функція безрозмірного часу  $m_{ocp}$  в умовах сталого різання під час торцевого фрезерування може бути визначена:

$$m_{ocp} = m(x + \tau_p/2). \quad (7)$$

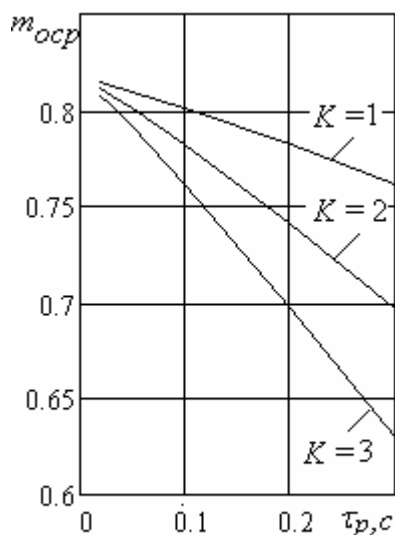


Рис. 4. Графіки залежності функції безрозмірного часу  $m_{osc}$  в умовах сталого різання під час фрезерування від тривалості робочого ходу  $\tau_p$

різання за допомогою середньої функції безрозмірного часу  $m_{osc}$  для умов уривчастого різання під час торцевого фрезерування:

$$\Theta_{фрез} = \frac{(\Theta_{nl}l + \Theta_{zh}h)m_{osc}}{l + h} = \frac{[q_1l(M_1l + N_1h) + q_2h(M_2h + N_1l)]m_{osc}}{(l + h)\lambda_u}, \quad (8)$$

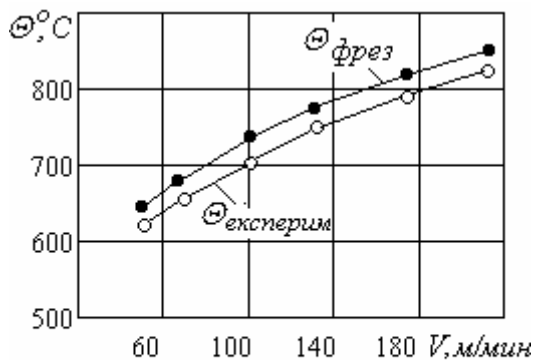


Рис. 5. Графіки залежності температури різання від швидкості для обробки сталі 30ХГСА

### 3. Висновки

Встановлені закономірності формування функції безрозмірного часу для безперервного та уривчастого різання в умовах несталого та сталого теплообміну. Виконана кількісна оцінка впливу параметрів торцевого фрезерування на функцію безрозмірного часу, яка характеризує зниження температури уривчастого різання в порівнянні з безперервним за рахунок холостих ходів.

Графіки залежності середньої функції безрозмірного часу  $m_{osc}$  в умовах сталого різання під час фрезерування від тривалості робочого ходу  $\tau_p$  для різних співвідношень тривалості холостих та робочих ходів наведені на рис. 4. Середня функція безрозмірного часу  $m_{osc}$  зменшуються з ростом тривалості робочого ходу та співвідношення тривалості холостих та робочих ходів.

Середня функція безрозмірного часу  $m_{osc}$  характеризує зниження температур різання під час уривчастого різання в порівнянні з безперервним в умовах сталого теплообміну під час торцевого фрезерування.

Визначення середньої функції безрозмірного часу  $m_{osc}$  для заданих умов обробки дозволяє суттєво спростити методику аналітичного розрахунку температури різання під час торцевого фрезерування.

Суть удосконаленої методики полягає в визначенні спочатку теплових потоків та температури різання для безперервного процесу в умовах сталого теплообміну, а потім коректування температури різання

Для перевірки адекватності встановленої аналітичної залежності  $\Theta_{фрез}$  виконане її порівняння з результатами експериментальних досліджень температури різання  $\Theta_{експерим}$  під час фрезерування сталі 30ХГСА (подача  $S = 0,1$  мм/зуб, глибина різання  $t = 0,5$  мм) [6], графіки яких наведені на рис. 5. Достатньо високий ступінь збігу теоретичних та експериментальних залежностей (похибка не перевищує 10%) свідчить про адекватність теоретичної моделі та можливості використання розробленої методики для розрахунків температури різання під час фрезерування.

Розроблена та експериментально підтверджена удосконалена методика визначення температури різання під час фрезерування з урахуванням уривчастості процесу різання в умовах несталого теплообміну, яка суттєво спрощує розрахунки.

Розроблена методика визначення параметрів може бути використана для будь-яких видів уривчастого різання.

### **Перелік літератури**

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

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

3. Івченко Т.Г. Исследование тепловых потоков и температур в зоне резания при неустановившемся теплообмене / Т.Г. Івченко, И.А. Петряева, Е.В. Полякова // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць.. – Краматорськ, ДДМА. Вип.28, 2011.- С.280-283.

4. Івченко Т.Г. Дослідження впливу параметрів механічної обробки на температуру різання під час фрезерування / Т.Г. Івченко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. Випуск 9(205). - Донецьк, ДонНТУ, 2012.- С.23-29.

5. Івченко Т.Г. Аналіз можливостей керування температурою фрезерування з урахуванням уривчастості процесу різання / Т.Г. Івченко // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы. Материалы 14 международного научно-практического семинара. Т. 2. – Донецк: ДонНТУ, 2013. – С.116 -120.

6. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. - М.: Машиностроение, 1976.- 278с.

Надійшла до редколегії 14.05.2014 р.

**Т.Г. Івченко**

#### **УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ АНАЛИТИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ТОРЦЕВОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ**

*Выполнен анализ закономерностей формирования тепловых потоков и температур резания в зависимости от параметров процесса фрезерования. Разработана усовершенствованная методика расчета температуры резания при фрезеровании с учетом прерывистости процесса в условиях неустановившегося теплообмена, подтвержденная экспериментально.*

**Ключевые слова:** тепловой поток, температура, неустановившийся процесс, фрезерование.

**T.G. Ivchenko**

#### **IMPROVEMENT OF THE ANALYTICAL CALCULATION METHOD OF CUTTING TEMPERATURE AT MILLING**

*The analysis of conformities to law of forming of thermal streams and cutting temperatures in the area of treatment depending on the parameters of milling process is executed. The improvement calculation method of cutting temperature at milling taking into account irregularity of process in the conditions of the unset heat exchange is developed, which is confirmed experimentally.*

**Key words:** thermal stream, temperature, unset process, milling.