

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССУ РИЗАНИЯ З ОБЛІКОМ ТЕМПЕРАТУРНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Івченко Т. Г.

Усовершенствована методика оптимизации параметров процесса резания по критерию максимальной производительности с обоснованием условий необходимости учета ограничений по температуре резания. Определены граничные значения температур, для которых необходимо учитывать температурные ограничения в зависимости от условий чистовой и черновой токарной обработок, исключающие возможность необоснованного завышения режимов резания. Установлены аналитические зависимости для расчета оптимальных по критерию максимальной производительности скорости резания и подачи для любых условий чистовой и черновой токарной обработок с учетом температурных ограничений.

Удосконалена методика оптимізації параметрів процесу різання за критерієм максимальної продуктивності з обґрунтуванням умов необхідності врахування обмежень по температурі різання. Визначені граничні значення температур, для яких необхідно враховувати температурні обмеження для чистової та чорнкової токарної обробок під час оптимізації режимів різання, що виключає можливість необґрунтованого завищення режимів. Встановлені аналітичні залежності для розрахунку оптимальних за критерієм максимальної продуктивності швидкості різання та подачі для будь яких умов чистової та чорнкової токарної обробок з урахуванням температурних обмежень.

The method of optimization of cutting process parameters on the criterion of the maximal productivity is improved with the ground of necessity of account of the cutting temperature limitations. The scope values of temperatures for which it is necessary to take into account temperature limitations depending on terms clean and draft lathe treatments are certain which eliminating possibility of the groundless overstating of the cutting regimes. Analytical dependences for a calculation optimum on the criterion of the maximal productivity of cutting speed and feed for any terms clean and draft lathe treatments taking into account temperature limitations are set.

Івченко Т. Г.

канд. техн. наук, доцент ДонНТУ
ivchenko.sovet@gmail.com

УДК 621.9: 658.5

Івченко Т. Г.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ З ОБЛІКОМ ТЕМПЕРАТУРНИХ ОБМЕЖЕНЬ

Одним з резервів підвищення продуктивності технологічних процесів механічної обробки деталей є оптимізація параметрів процесу різання, у зв'язку з чим тема представленої роботи вельми актуальна.

Найбільш поширеним серед методів оптимізації параметрів процесу різання є метод лінійного програмування, який за умов лінійності або можливості лінеаризації цільової функції і обмежень відрізняється від інших простотою та можливістю графічної інтерпретації рішень [1]. Цей метод дозволяє здійснювати одночасну оптимізацію режимів різання – швидкості і подачі за критерієм максимальної продуктивності з урахуванням діючих під час обробки технічних обмежень.

В даний час широко використовується графічний метод пошуку оптимальних режимів різання, а також запропоновані аналітичні залежності оптимальних режимів різання від умов обробки [2, 3]. Проте, більшість отриманих результатів не враховують особливостей дії температурних обмежень у зв'язку з відсутністю достатньої кількості інформації з теплового стану інструменту та температури різання для різних умов обробки. Теоретичний та практичний інтерес має аналітичне визначення оптимальних режимів різання, що враховують температурні обмеження та забезпечують для заданих умов обробки максимальну продуктивність.

Мета представленої роботи – удосконалення методики оптимізації параметрів процесу різання за критерієм максимальної продуктивності з обґрунтуванням умов необхідності врахування обмежень по температурі різання.

Як цільова функція розглядається продуктивність, обумовлена основним часом:

$$t_o = L/nS = \pi DL/1000VS, \quad (1)$$

де L – довжина обробки;

n – частота обертання деталі;

S подача;

D – діаметр обробки;

V – швидкість різання.

Максимум продуктивності досягається при мінімумі основного часу, або максимумі добутку $n \cdot S \rightarrow \max$.

Під час токарної обробки найбільш розповсюджені наступні обмеження:

– по можливостях ріжучого інструмента, які обумовлені швидкістю різання, що відповідає його стійкості T ;

– по потужності різання, яка обумовлена потужністю електродвигуна приводу головного руху верстата N_{cm} ;

– по міцності державки різця;

– по міцності пластини різця;

– по гранично припустимій шорсткості обробленої поверхні R_a ;

– по жорсткості деталі;

– по гранично припустимій температурі різання Θ ;

– по припустимих діапазонах частоти обертання і подачі. обумовленим кінематичною структурою приводу головного руху і приводу подачі.

В результаті лінеаризації цільової функції й обмежень шляхом логарифмування для чистової токарної обробки визначена наступна математична модель процесу різання:

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, \\ (n_P + 1)X1 + y_P X2 \leq b_2, \\ n_P X1 + y_P X2 \leq b_3, \\ k_3 X1 + k_2 X2 \leq b_2 \\ n_t X1 + y_t X2 \leq b_5, \\ X1 \geq b_6, \quad X1 \leq b_7, \\ X2 \geq b_8, \quad X2 \leq b_9, \\ (X1 + X2) \rightarrow \max; \end{cases} \quad \begin{aligned} b_1 &= \ln(1000 C_V K_V / \pi D T^m t^{x_v}); \\ b_2 &= \ln(6 \cdot 10^3 (n_P + 2) N_{cm} \eta / C_P K_P (\pi D)^{(n_P + 1)} t^{x_P}); \\ b_3 &= \ln\left(\frac{1000^{n_0} 0,05 D^4 K_3 E_\delta f_\delta}{1.1 \cdot 10 C_P K_P (\pi D)^{n_P} t^{x_P} L^3 \mu}\right); \\ b_4 &= \ln(R_a (\pi D / 1000)^{k_3} / k_0 K_R); \\ b_5 &= \ln(1000^{z_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta (\pi D)^{z_t}); \\ b_6 &= \ln n_{min}; \quad b_7 = \ln n_{max}; \quad b_8 = \ln S_{min}; \quad b_9 = \ln S_{max}, \end{aligned} \quad (2)$$

де t – глибина різання;

C_V, K_V – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

x_v, y_v, m – показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на швидкість різання;

C_P, K_P – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

x_P, y_P, n_P – показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і швидкості на силу різання;

η – коефіцієнт корисної дії передач верстата;

k_0, K_R – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

k_1, k_3 – показники, що характеризують ступінь впливу подачі і швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні;

E_δ – модуль пружності матеріалу деталі;

f_δ – допустима стріла прогину деталі;

L – довжина деталі;

K_3, μ – коефіцієнти, що залежать від способу закріплення деталі;

C_Θ, K_Θ – постійний коефіцієнт та коефіцієнт, що враховує умови обробки;

x_t, y_t, z_t – показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі та швидкості на температуру різання.

Для чорнової токарної обробки визначена наступна математична модель процесу різання:

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, \\ (n_P + 1)X1 + y_P X2 \leq b_2, \\ n_P X1 + y_P X2 \leq b_3, \\ y_P X2 \leq b_4, \\ z_t X1 + y_t X2 \leq b_5, \\ X1 \geq b_6, \quad X1 \leq b_7, \\ X2 \geq b_8, \quad X2 \leq b_9, \\ (X1 + X2) \rightarrow \max; \end{cases} \quad \begin{aligned} b_1 &= \ln(1000 C_V K_V / \pi D T^m t^{x_v}); \\ b_2 &= \ln(6 \cdot 10^3 (n_P + 2) N_{cm} \eta / C_P K_P (\pi D)^{(n_P + 1)} t^{x_P}); \\ b_3 &= \ln(\sigma_u B H^2 1000^n / 6 l C_P K_P (\pi D)^{n_P} t^{x_P} K_3); \\ b_4 &= \ln(34 c^{1.35} K_\varphi / C_P K_P t^{(x_P - 0.77)}); \\ b_5 &= \ln(1000^{z_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta (\pi D)^{z_t}); \\ b_6 &= \ln n_{min}; \quad b_7 = \ln n_{max}; \quad b_8 = \ln S_{min}; \quad b_9 = \ln S_{max}, \end{aligned} \quad (3)$$

де l – виліт державки різця;

σ_u – допустиме напруження на вигин для матеріалу державки;

B і H – ширина і висота державки;

K_3 – коефіцієнт, що залежить від способу закріплення деталі;

c – товщина пластини;

$K_\varphi = (\sin 60^\circ / \sin \varphi)^{0,8}$ – коефіцієнт, що враховує головний кут різця в плані φ .

Приклад визначення оптимальних режимів різання для чистової токарної обробки приведений для умов: вал зі сталі 45 (рис. 1, а) діаметром $D = 100$ мм, довжиною $L = 300$ мм різцями з механічним закріпленням твердосплавних пластин Т15К6 (геометричні параметри: головний кут в плані $\varphi = 45^\circ$, передній кут $\gamma = 0^\circ$, радіус при вершині $r = 1$ мм); стійкість $T = 60$ хв., глибина різання $t = 1$ мм; припустима шорсткість обробленої поверхні $R_a = 3,2$ мкм.

Приклад визначення оптимальних режимів різання для чорнової токарної обробки приведений для умов: вал зі сталі Х18Н9Т (рис. 1, б) діаметром $D = 100$ мм, довжиною $L = 300$ мм різцями з механічним закріпленням твердосплавних пластин ВК8 (геометричні параметри: головний кут в плані $\varphi = 45^\circ$, передній кут $\gamma = 0^\circ$, товщина пластини $c = 4,76$ мм, ширина і висота державки $B = 20$ мм, $H = 25$ мм, виліт різця $l = 25$ мм.); стійкість $T = 30$ хв., глибина різання $t = 3$ мм; знос по задній поверхні леза $h = 0,2$ мм на токарному верстаті 16К20Ф3 (потужність $N_{cm} = 10$ кВт; коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,8$).

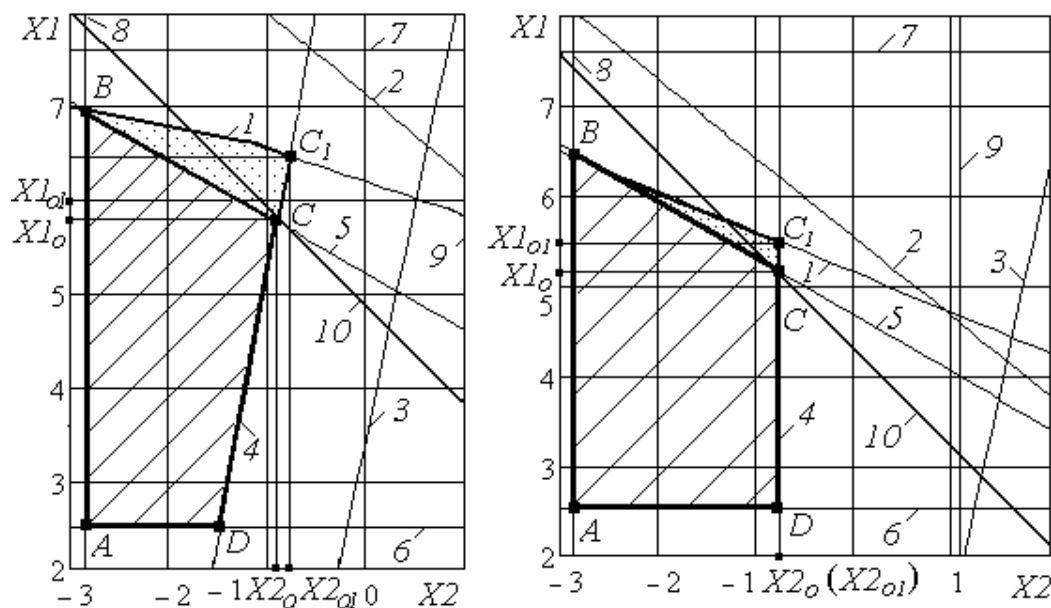


Рис. 1. Схема визначення оптимальних режимів різання для токарної обробки чистової сталі 45 (а), чорнової сталі Х18Н9Т (б)

Для заданих умов чистової обробки прийняті [4]:

– коефіцієнти та показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на швидкість різання: $C_V = 420$; $K_V = 1$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,20$; $m = 0,2$;

– коефіцієнти і показники, що характеризують ступінь впливу подачі, переднього кута γ , радіуса при вершині r і швидкості на шорсткість обробленої поверхні: $k_0 = 7,0$; $k_1 = 0,85$; $k_2 = 0,65$; $k_3 = 0,36$; $k_4 = 0,15$; (для обробки сталі $K_R = (90 + \gamma)^{k_4} / r^{k_2}$);

– коефіцієнти і показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і швидкості на силу різання: $C_P = 300$; $K_P = 0,84$; $x_p = 1,0$; $y_p = 0,75$; $n_p = -0,15$; $K_3 = 2,4$; $\mu = 1,2$;

– коефіцієнти та показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на температуру різання: $C_\theta = 314$; $K_\theta = 1$; $x_t = 0,04$; $y_t = 0,14$; $z_t = 0,23$.

Для заданих умов чорнової обробки прийняті [5]:

– коефіцієнти та показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на швидкість різання: $C_V = 150$; $x_v = 0,15$; $y_v = 0,45$; $m = 0,25$;

– коефіцієнти і показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і швидкості на силу різання: $C_P = 3400$; $K_P = 1$; $x_p = 0,95$; $y_p = 0,75$; $n_p = -0,15$;

– коефіцієнти та показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на температуру різання: $C_\Theta = 143$; $K_\Theta = 1$; $x_t = 0,1$; $y_t = 0,31$; $z_t = 0,49$.

Для чистової обробки (рис. 1, а) крапка С в багатокутнику ABCD, який являє собою область можливих рішень для чистової обробки і в якій цільова функція приймає максимальне значення (про що свідчить положення лінії 10), є крапкою перетину обмежень по шорсткості обробленої поверхні (4) та по температурі різання (5). Координати крапки С ($X1_o$, $X2_o$) є шуканими оптимальними значеннями параметрів $X2_o = -0,901$; $X1_o = 5,772$. Для заданих умов чистової обробки визначені оптимальні режими: частота обертання $n_o = 320$ об/хв, швидкість різання $V_o = 100$ м/хв, подача $S_o = 0,4$ мм/об. В тому разі, якщо температурне обмеження (5) не враховується, оптимальні режими різання визначаються координатами крапки $C_1(X1_{o1}$, $X2_{o1})$, яка є крапкою перетину обмежень по шорсткості обробленої поверхні (4) та по можливостям різального інструменту (1): $X2_{o1} = -0,767$; $X1_{o1} = 6,553$. Оптимальні режими: частота обертання $n_o = 687$ об/хв, швидкість різання $V_o = 215$ м/хв, подача $S_o = 0,46$ мм/об. Значення цих параметрів перевищує ті, що визначенні з урахуванням температурного обмеження (по швидкості в 2,1 рази, по подачі – в 1,2 рази).

Для чорнової обробки (рис. 1, б) крапка С в багатокутнику ABCD є крапкою перетину обмежень по гранично припустимій міцності пластини різця (4) та по температурі різання (5). Координати крапки С ($X1_o$, $X2_o$) є шуканими оптимальними значеннями параметрів $X2_o = -0,517$; $X1_o = 5$. Оптимальні режими: частота обертання $n_o = 148$ об/хв, швидкість різання $V_o = 47$ м/хв, подача $S_o = 0,6$ мм/об. Без урахування температурного обмеження (5) оптимальні режими різання визначаються координатами крапки $C_1(X1_{o1}$, $X2_{o1})$, яка є крапкою перетину обмежень по міцності пластини різця (4) та по можливостям різального інструменту (1): $X2_{o1} = -0,517$; $X1_{o1} = 5,386$. В такому разі оптимальні режими різання підвищуються (по швидкості – в 1,5 рази): частота обертання $n_o = 218$ об/хв, швидкість різання $V_{o1} = 69$ м/хв, подача $S_{o1} = 0,6$ мм/об.

Граничне значення температури різання, яке є границею впливу температури на оптимальні параметри, для чистової обробки визначає крапка одночасного перетину обмежень по шорсткості обробленої поверхні, по можливостям різального інструменту, по температурі різання; для чорнової обробки – крапка одночасного перетину обмежень по припустимій міцності пластини різця, по можливостям різального інструменту, по температурі різання. Пошук аналітичних виражень температур різання, що визначають границю впливу температури на оптимальні параметри, виконується на підставі спільного рішення системи наступних рівнянь відповідно, для чистової та чорнової обробок:

$$\begin{cases} nS^{y_v} = 1000C_V K_V / \pi D T^m t^{x_v}; \\ n^{z_t} S^{y_t} = 1000^{z_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta (\pi D)^{z_t}; \\ n^{k_3} S^{k_2} = R_a (\pi D / 1000)^{k_3} / k_o K_R. \end{cases} \quad \begin{cases} nS^{y_v} = 1000C_V K_V / \pi D T^m t^{x_v}; \\ n^{z_t} S^{y_t} = 1000^{z_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta (\pi D)^{z_t}; \\ S^{y_p} = 34c^{1.35} K_\phi / C_P K_P t^{(x_p - 0.77)}. \end{cases} \quad (4)$$

Рішення цих систем визначає граничне значення температур, для яких необхідно враховувати температурне обмеження (Θ_{o1} – для чистової обробки, Θ_{o2} – для чорнової):

$$\Theta_{o1} = C_\Theta K_\Theta \left(\frac{C_V K_V}{T^m t^{x_v}} \right)^{z_t} \left[\frac{R_a T^{m k_3}}{k_o K_R (C_V K_V)^{k_3}} \right]^{k_1 - y_v z_t}; \quad (5)$$

$$\Theta_{o2} = C_{\Theta} K_{\Theta} \left(\frac{C_V K_V}{T^m t^{x_v}} \right)^{z_t} \left[\frac{340 c^{1,35} t^{(0,77-x_p)} K_{\varphi}}{C_P K_P} \right]^{\frac{y_t - y_v z_t}{y_p}} \quad (6)$$

На підставі виконаного аналізу обмежень, для будь яких умов чистової токарної обробки оптимальні подача S_{o1} та швидкість різання V_{o1} можуть бути визначені аналітично:

$$S_{o1} = \begin{cases} \left(\frac{\Theta (k_o K_R)^{z_t/k_3}}{C_{\Theta} K_{\Theta} R_a^{z_t/k_3}} \right)^{\frac{k_3}{y_t k_3 - z_t k_1}}, & \text{якщо } \Theta < \Theta_0; \\ \left(\frac{R_a T^m k_3 t^{k_3 x_v}}{k_o K_R (C_V K_V)} \right)^{1/(k_1 - y_v k_3)}, & \text{якщо } \Theta \geq \Theta_0; \end{cases} \quad V_{o1} = \begin{cases} \left(\frac{R_a}{k_o K_R S_o^{k_1}} \right)^{1/k_3}, & \text{якщо } \Theta < \Theta_0; \\ \frac{C_V K_V}{T^m t^{x_v} S_o^{y_v}}, & \text{якщо } \Theta \geq \Theta_0. \end{cases} \quad (7)$$

Для чорнової токарної обробки оптимальні подача S_{o2} та швидкість різання V_{o2} :

$$S_{o2} = \left(\frac{340 c^{1,35} t^{(0,77-x_p)}}{C_P K_P K_{\varphi}^{-1}} \right)^{\frac{1}{y_p}}; \quad V_{o2} = \begin{cases} \left(\frac{\Theta}{C_{\Theta} K_{\Theta}} \right)^{\frac{1}{z_t}} \left[\frac{C_P K_P}{340 c^{1,35} t^{(0,77-x_p)} K_{\varphi}} \right]^{\frac{y_t}{y_p z_t}}, & \text{якщо } \Theta < \Theta_0, \\ \left(\frac{C_V K_V}{T^m t^{x_v}} \right) \left(\frac{C_P K_P}{340 c^{1,35} t^{(0,77-x_p)} K_{\varphi}} \right)^{\frac{y_v}{y_p}}, & \text{якщо } \Theta \geq \Theta_0. \end{cases} \quad (8)$$

На підставі розроблених аналітичних залежностей розроблені рекомендації з вибору оптимальних режимів різання для будь яких умов чистової та чорнової токарної обробки.

ВИСНОВКИ

Удосконалена методика оптимізації параметрів процесу різання за критерієм максимальної продуктивності з обґрунтуванням необхідності врахування обмежень по температурі різання. Встановлені граничні значення температур, для яких необхідно враховувати температурне обмеження для чистової та чорнової токарної обробки під час оптимізації режимів різання, що виключає можливість необґрунтованого завищення режимів без урахування цих обмежень. Визначені аналітичні залежності для розрахунку оптимальних за критерієм максимальної продуктивності швидкості різання та подачі для будь яких умов чистової та чорнової токарної обробки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Старков В. К. *Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве* / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 1989. – 296 с.
2. Івченко Т. Г. *Использование мультипликативных критериев при оптимизации режимов резания* / Т. Г. Івченко // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем* : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – Вип. 30. – С. 325–330.
3. Івченко Т. Г. *Двохкритеріальна оптимізація режимів різання під час обробки чавунів інструментами з надтвердих матеріалів* / Т. Г. Івченко, Є. В. Полякова // *Прогресивные технологии и системы машиностроения*. – Донецьк : ДонНТУ, 2011. – Вип. 41. – С. 152–158.
4. *Справочник технолога – машиностроителя. В 2-х т. Т. 1* / под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 2001. – 910 с.
5. *Режимы резания труднообрабатываемых материалов : справочник* / Я. Л. Гуревич, М. В. Горохов, В. И. Захаров и др. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1986. – 240 с.

Стаття надійшла до редакції 15.12.2012 р.