

УДК 621.9: 658.5

Т.Г. Івченко

Донецький національний технічний університет, Україна
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: tm@mech.dgtu.donetsk.ua

ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРУВАННЯ ЗА РАХУНОК ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ

З використанням критерія максимальної продуктивності визначені оптимальні режими різання чорнової та чистової обробки торцевими твердосплавними фрезами. Встановлені температурні обмеження та обмеження з шорсткості обробленої поверхні для чистового фрезерування. На підставі визначених аналітичних залежностей оптимальних значень подачі і швидкості різання від параметрів процесу фрезерування розроблені рекомендації з вибору оптимальних режимів різання для будь-яких умов обробки. Надана кількісна оцінка можливостей підвищення продуктивності обробки за рахунок оптимізації режимів різання.

Ключові слова: фрезерування, продуктивність, швидкість, подача, оптимізація, температура, шорсткість.

Вступ

Важливим резервом підвищення продуктивності сучасних технологічних процесів виготовлення деталей машин є оптимізація параметрів їх механічної обробки, у зв'язку з чим тема представленої роботи, присвячена оптимізації режимів різання під час фрезерування, вельми актуальна.

Серед сучасних методів оптимізації режимів різання найбільш поширеним 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, 2]. Цей метод дозволяє здійснювати одночасну оптимізацію швидкості різання і подачі з урахуванням діючих під час різання технічних обмежень.

В даний час досить добре розроблений і широко використовується графічний метод пошуку оптимальних режимів різання, а також запропоновані аналітичні залежності оптимальних режимів різання від умов обробки як сталей, в тому складі трудно оброблюваних, так і чавунів [3, 4, 5]. Проте, усі отримані результати відносяться до токарної обробки і не враховують особливостей фрезерування.

Найбільші труднощі в оптимізації режимів різання для фрезерної обробки виникають у зв'язку з відсутністю достатньої кількості інформації з обмежень по шорсткості обробленої поверхні та по температурі різання під час чистового фрезерування. Методика визначення цих обмежень для токарної обробки [3, 4] потребує подальшого розвитку з урахуванням особливостей процесу фрезерування. Відома методика розрахунків температур в лезі зуба торцевої фрези [6] може бути використана для визначення температурних обмежень під час фрезерування, однак також потребує уточнення стосовно розрахунків температур різання.

Таким чином, представляє інтерес подальше удосконалення методики оптимізації режимів різання для різних умов фрезерної обробки з урахуванням обмежень по шорсткості обробленої поверхні і по температурі різання.

Мета представленої роботи - визначити оптимальні режими різання, що забезпечують для заданих умов обробки максимальну продуктивність чорнової та чистової обробки торцевими твердосплавними фрезами.

Основний зміст і результати роботи

Критерій оптимізації –продуктивність фрезерної обробки. Цільова функція - продуктивність обробки, максимум якої досягається при мінімумі основного часу, або максимумі добутку $n \cdot s \rightarrow \max$ (n – частота обертання, s – подача).

Під час чорнового фрезерування розглядаються наступні обмеження:

1) по можливостях різального інструменту, обумовлених швидкістю різання, що відповідає його стійкості;

2) обмеження по гранично припустимій потужності різання, обумовленій потужністю електродвигуна приводу головного руху верстата;

3) по міцності твердосплавної різальної пластини зуба фрези;

4) по гранично припустимих діапазонах частоти обертання й подачі, обумовлених кінематичною структурою приводів головного руху й подачі.

Математична модель процесу різання під час чорнового фрезерування:

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1; \\ (1 - w_P) X1 + y_P X2 \leq b_2; \\ y_P X2 \leq b_3; \\ X1 \geq b_4; X1 \leq b_5; \\ X2 \geq b_6; X2 \leq b_7; \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, \end{cases} \quad \begin{aligned} b_1 &= \ln(10^3 C_V K_V D^{q_V - 1} / \pi T^{m_V} t^{x_V} B^{u_V} z^{p_V}) \\ b_2 &= \ln(6 \cdot 10^6 N_{cm} \eta / C_P K_P B^{u_P} t^{x_P} z^{p_P} \pi D^{1 - q_P}); \\ b_3 &= \ln \left[34 c^{1.35} (\sin 60^\circ / \sin \varphi)^{0.8} D^{q_P} / C_P K_P B^{u_P} t^{x_P - 0.77} z \right]; \\ b_4 &= \ln n_{min}; b_5 = \ln n_{max}; b_6 = \ln s_{min}; b_7 = \ln s_{max}; \\ X1 &= \ln n; X2 = \ln s, \end{aligned} \quad (1)$$

де - C_V, K_V – коефіцієнти, $x_V, y_V, m_V, q_V, u_V, p_V$ – показники, які характеризують ступінь впливу глибини t , подачі s , стійкості T , діаметру фрези D та ширини фрезерування B на швидкість різання V ($V = \pi D n / 1000$); z – число зубів фрези; N_{cm} – потужність електродвигуна приводу головного руху верстата; η – коефіцієнт корисної дії приводу головного руху; C_P, K_P – коефіцієнти, x_P, y_P, q_P, u_P, w_P – показники, які характеризують ступінь впливу глибини t , подачі s , діаметру фрези D , ширини фрезерування B та швидкості різання V на силу різання P_z ; c – товщина пластини; φ – головний кут в плані; $n_{min}, n_{max}, s_{min}, s_{max}$ – гранично припустимі діапазони частоти обертання n й подачі s .

Визначення оптимальних режимів різання виконано для чорнового фрезерування на вертикально-фрезерному верстаті 6550 (потужність $N_{cm} = 10$ кВт; коефіцієнт корисної дії $\eta = 0,8$) плоскої поверхні деталі зі сталі 45 (міцність $\sigma_s = 750$ МПа), торцевими насадними фрезами з механічним кріпленням твердосплавних п'ятигранних пластин Т15К6. Параметри обробки: діаметр торцевої фрези $D = 125$ мм, ширина фрезерування $B = 85$, число зубів фрези $z = 8$; геометричні параметри: головний кут у плані $\varphi = 67^\circ$, передній кут $\gamma = -11^\circ$, товщина пластини $c = 4,76$ мм, стійкість фрези $T = 180$ хв., глибина різання $t = 5$ мм. Математична модель процесу різання, що виражена системою лінійних нерівностей (1), графічно представлена на рис. 1.

Для заданих умов механічної обробки прийняті наступні коефіцієнти й показники, які характеризують ступінь впливу глибини, подачі й стійкості на швидкість різання: $C_V = 332$; $K_V = 0,65$; $x_V = 0,1$; $y_V = 0,4$; $m = 0,2$; $q_V = 0,2$; $u_V = 0,2$; $p_V = 0$ [1]; коефіцієнти й показники, які характеризують ступінь впливу глибини, подачі й швидкості на силу різання: $C_P = 825$; $K_P = 0,84$; $x_P = 1,0$; $y_P = 0,75$; $n_P = -0,15$; $q_P = 1,3$; $u_P = 1,1$; $w_P = 0,2$ [1].

З їх урахуванням визначені наступні значення параметрів b_i : $b_1 = 4,964$; $b_2 = 5,002$; $b_3 = -2,191$; $b_4 = 3,45$; $b_5 = 7,378$; $b_6 = -3,689$; $b_7 = 0,182$.

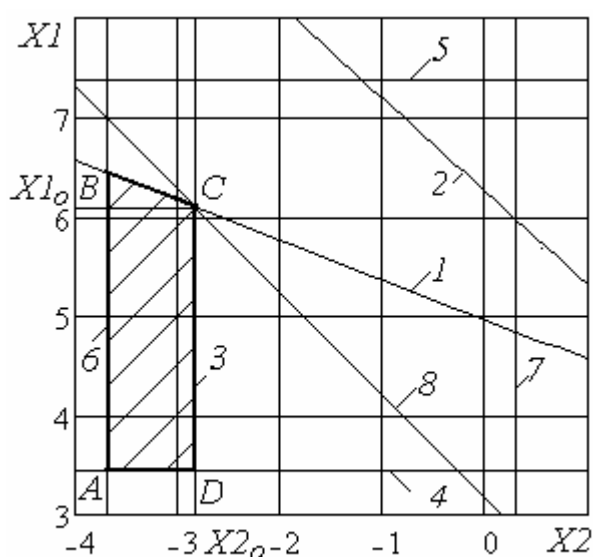


Рис. 1. Схема визначення оптимальних режимів різання під час чорнової фрезерної обробки

Для заданих умов механічної обробки визначені наступні результати розрахунку оптимальних режимів різання: $X2_o = -2,922$; $X1_o = 6,132$; $n_o = 500$ об/хв; $s_{zo} = 0,05$ мм/зуб; $s_o = 200$ мм/хв; $V_o = 200$ м/хв.

На підставі виконаного аналізу обмежень, для будь яких умов чорнової фрезерної обробки оптимальна подача та швидкість різання можуть бути визначені:

$$s_o = \left[\frac{34c^{1,25} t^{(0,77-x_p)} (\sin 60 / \sin \varphi)^{0,8}}{C_p K_{pz} B^{u_p}} \right]^{1/y_p}; V_o = \frac{C_v K_v D^{q_v}}{T^m t^{x_v} B^{u_v} z^{p_v} s_o^{y_p}}. \quad (2)$$

Рекомендації з вибору оптимальних режимів різання в залежності від параметрів обробки наведені на рис. 2. Графіки залежності оптимальної подачі від глибини різання представлені для різних діаметрів фрез; графіки залежності оптимальної швидкості різання від подачі для різних періодів стійкості фрез.

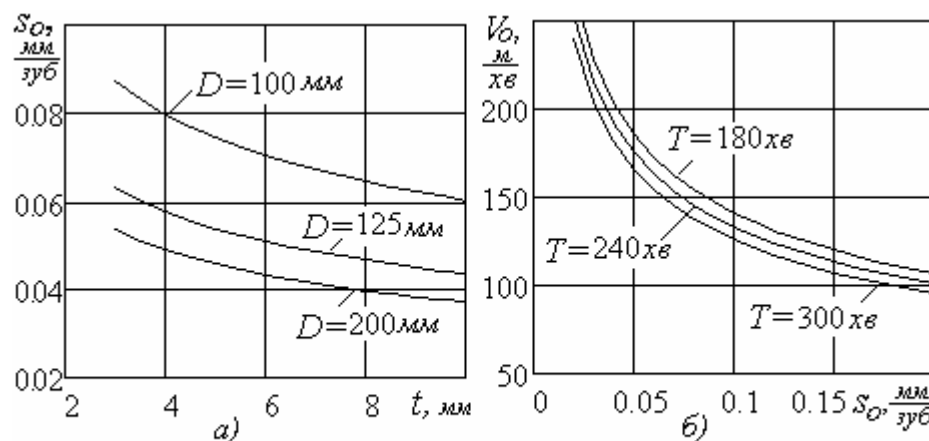


Рис. 2. Графіки залежності оптимальної подачі від глибини різання – а) та оптимальної швидкості різання від подачі – б) під час чорнової фрезерної обробки

Під час чистового фрезерування розглядаються наступні обмеження:

1) по можливостях різального інструменту;

2) по при-

пустимій температурі різання;

3) по припустимій шорсткості обробленої поверхні;

4) по гранично припустимих діапазонах частоти обертання й подачі.

Для визначення обмежень по припустимих температурах різання та шорсткості обробленої поверхні під час торцевого фрезерування виконані дослідження залежності цих параметрів від швидкості різання та подачі, які базуються на відомих методиках розрахунку шорсткості [5] та температур різання [6] по теоретичних залежностях.

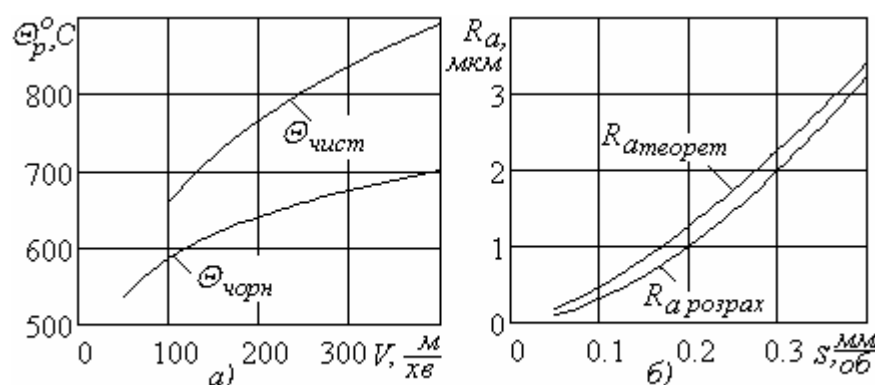


Рис. 3. Графіки залежності температури різання від швидкості різання - а), та шорсткості обробленої поверхні від подачі - б) під час торцевого фрезерування

З використанням регресійного аналізу встановлені аналітичні залежності температури різання $\Theta_{\text{чист}}$ від швидкості різання і подачі та шорсткості обробленої поверхні R_a від подачі (похибка не перевищує 10%), які необхідні для врахування температурних обмежень та обмежень по шорсткості під час оптимізації режимів різання чистового фрезерування:

$$\Theta_{\text{чист}} = 302,4 V^{0,23} s^{0,21}; R_{a \cdot \text{розрах}} = 11,6 s^{1,62}. \quad (3)$$

Математична модель процесу різання під час чистового фрезерування:

$$\begin{cases} z_V X_1 + y_V X_2 \leq b_1; \\ z_t X_1 + y_t X_2 \leq b_2; \\ a X_1 \leq b_3; \\ X_2 \geq b_4; X_2 \leq b_5; \\ X_1 \geq b_6; X_1 \leq b_7; \\ (X_1 + X_2) \rightarrow \max, \end{cases} \quad \begin{cases} b_1 = \ln(10^3 C_V K_V D^{q_V - 1} / \pi T^{m_V} t^{x_V} B^{u_V} z^{p_V}); \\ b_2 = \ln(10^{3z_t} \Theta_{\text{дон}} / (\pi D)^{z_t} C_t); \\ b_3 = \ln(R_{a \cdot \text{дон}} / A); \\ b_4 = \ln n_{\min}; b_5 = \ln n_{\max}; \\ b_6 = \ln s_{\min}; b_7 = \ln s_{\max}; \\ X_1 = \ln n; X_2 = \ln s, \end{cases} \quad (4)$$

де $\Theta_{\text{дон}}$ - припустима температура різання ($\Theta_{\text{дон}} = 800^\circ\text{C}$); C_t - коефіцієнт та y_t, z_t - показники, які характеризують ступінь впливу швидкості V та подачі s на температуру різання Θ ; $R_{a \cdot \text{дон}}$ - припустима шорсткість поверхні; A - коефіцієнт та a - показник ступеня, який характеризує ступінь впливу подачі s на шорсткість обробленої поверхні R_a .

Приклад визначення оптимальних режимів різання наведений для чистової фрезерної обробки (шорсткості обробленої поверхні $R_{a1} = 3,2\text{мкм}$, $R_{a2} = 0,63\text{мкм}$, глибина різання $t = 1\text{мм}$) за тими ж умовами, що і для чорнової. Математична модель процесу різання, що виражена системою нерівностей (3), графічно представлена на рис. 4.

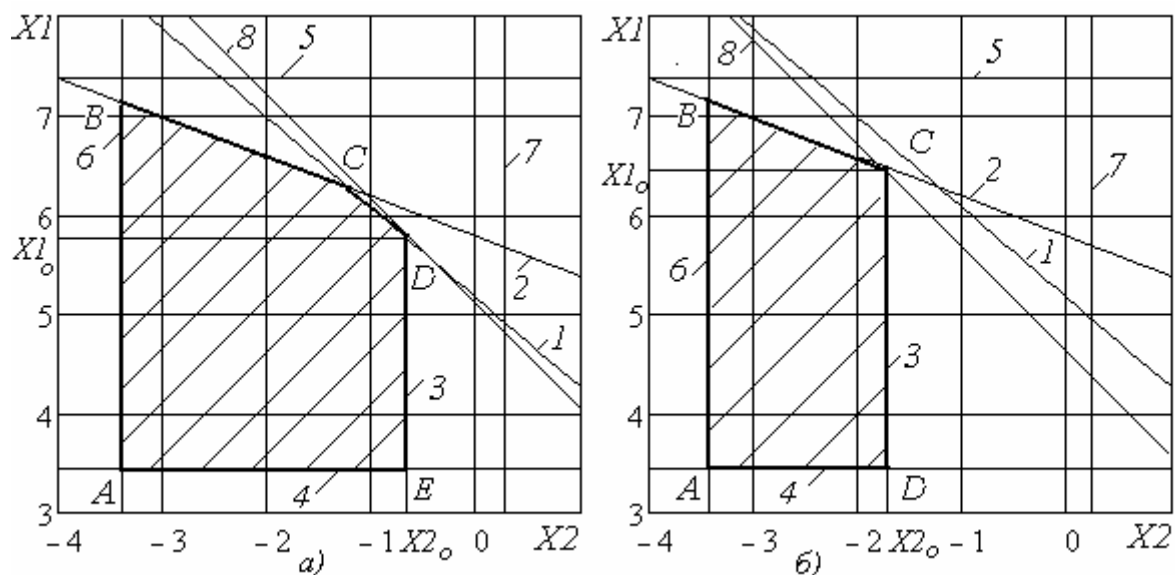


Рис. 4. Схема визначення оптимальних режимів різання під час чистової фрезерної обробки для різних значень шорсткості обробленої поверхні: $R_{a1} = 3,2\text{мкм}$ – а), $R_{a2} = 0,63\text{мкм}$ – б)

Для заданих умов механічної обробки прийняті наступні коефіцієнти й показники, які характеризують ступінь впливу глибини, подачі й стійкості на швидкість різання: $C_V = 332$; $K_V = 1$; $x_v = 0,1$; $y_v = 0,4$; $m_v = 0,2$; $q_v = 0,2$; $u_v = 0,2$; $p_v = 0$ [1]; коефіцієнт й показники, які характеризують ступінь впливу подачі та швидкості різання на температуру різання: $C_t = 302,4$; $y_t = 0,21$; $z_t = 0,23$; коефіцієнт й показник, які характеризують ступінь впливу подачі на шорсткість обробленої поверхні: $A_1 = 11,6$; $a = 1,62$ (3).

З їх урахуванням визначені наступні значення параметрів b_i : $b_1 = 5,348$; $b_2 = 4,476$; $b_3 = -1,761$; $b_4 = 3,45$; $b_5 = 7,378$; $b_6 = 1,569$; $b_7 = 7,09$.

Як свідчить графік на рис. 2а) під час чистової фрезерної обробки для шорсткості обробленої поверхні $R_{a1} = 3,2\text{мкм}$ активними є обмеження по гранично припустимій шорсткості обробленої поверхні (3) і обмеження по температурі різання (2). Для шорсткості обробленої поверхні $R_{a1} = 0,63\text{мкм}$ активними є обмеження по гранично припустимій шорсткості обробленої поверхні (3) і обмеження по можливостях різального інструменту (1).

Для заданих умов механічної обробки та $R_{a1} = 3,2\text{мкм}$ визначені наступні оптимальні режими різання ($X_{2o} = -0,795$; $X_{1o} = 5,884$): $n_o = 315\text{об/хв}$; $s_o = 0,48\text{мм/об}$; $s_o = 150\text{мм/хв}$; $V_o = 123,7\text{м/хв}$; для $R_{a2} = 0,63\text{мкм}$ визначені наступні результати розрахунку оптимальних режимів різання ($X_{2o} = -1,8$; $X_{1o} = 6,498$): $n_o = 630\text{об/хв}$; $s_o = 0,19\text{мм/об}$; $s_o = 120\text{мм/хв}$; $V_o = 247,4\text{ м/хв}$.

Пошук аналітичного вираження шорсткості обробленої поверхні R_a , що визначає границю впливу шорсткості на оптимальні параметри й визначає крапку одночасного перетину обмежень (1), (2) і (3), виконується на підставі спільного рішення системи наступних рівнянь:

$$\begin{cases} ns^{y_v} = 10^3 C_V D^{q_v} K_V / \pi D T^{m_v} t^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}; \\ n^{z_t} s^{y_t} = 10^{3z_t} \Theta_{don} / (\pi D)^{z_t} C_t; \\ s^a = R_{ao} / A. \end{cases} \quad (5)$$

Рішення цієї системи:

$$R_{ao} = A \left[\left(\frac{C_t}{\Theta_{don}} \right)^{1/z_t} \left(\frac{C_V D^{q_v} K_V}{T^{m_v} t^{x_v} B^{u_v} z^{p_v}} \right) \right]^{z_t a / (y_v z_t - y_t)}. \quad (6)$$

На підставі виконаного аналізу, для будь-яких умов чистової фрезерної обробки оптимальні подача та швидкість різання можуть бути визначені:

$$s_o = (R_{adon}/A)^{1/a}; \quad \begin{cases} V_o = C_V D^{q_v} K_V / T^{m_v} t^{x_v} B^{u_v} s_o^{y_v}, & \text{якщо } R_a \geq R_{ao}; \\ V_o = \Theta_{don} / C_t s_o^{y_t}, & \text{якщо } R_a \leq R_{ao}. \end{cases} \quad (7)$$

Рекомендації з вибору оптимальних режимів різання в залежності від параметрів обробки наведені на рис. 5. Графіки залежності оптимальної подачі від шорсткості представлені для різних радіусів при вершині леза фрез; графіки залежності оптимальної швидкості різання від подачі – для різних періодів стійкості фрез та допустимих температур різання.

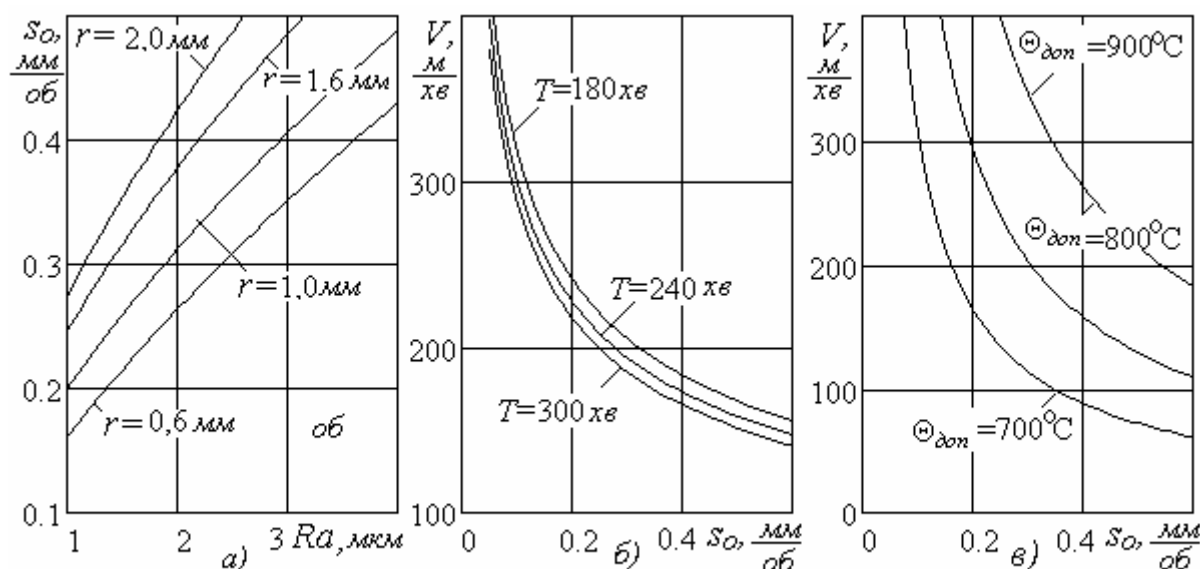


Рис. 5. Графіки залежності оптимальної подачі від шорсткості – а) та оптимальної швидкості різання від подачі для різних періодів стійкості – б) та різних температур різання – в) під час чистової фрезерної обробки

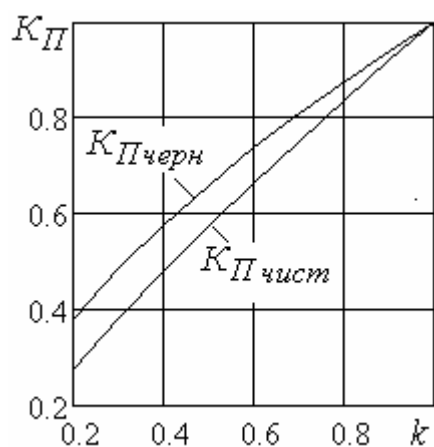


Рис. 6. Залежність коефіцієнтів зміни продуктивності K_{Π} від ступеня k відхилення режимів різання від оптимальних

при відхиленні вибраних режимів різання від їх оптимальних значень під час чорнової $K_{\Pi_{чорн}}$ та чистової $K_{\Pi_{чист}}$ обробок:

На підставі встановлених аналітичних залежностей може бути виконана кількісна оцінка можливості підвищення продуктивності фрезерної обробки за рахунок визначення оптимальних режимів різання. Пропонується введення коефіцієнта зміни продуктивності K_{Π} обробки при відхиленні вибраних режимів різання – подачі s та швидкості різання V від їх оптимальних значень s_o та V_o :

$$K_{\Pi} = (s/s_o)(V/V_o). \quad (8)$$

Якщо прийняти ступінь відхилення вибраної подчі від її оптимального значення $k = s/s_o$, то подача $s = ks_o$, швидкість різання:

$$\text{для чорнової обробки - } V_{чорн} = V_o k^{(-y_v)},$$

$$\text{для чистової обробки - } V_{чист} = V_o k^{(-y_t/z_t)}$$

Коефіцієнти зміни продуктивності K_{Π} обробки

$$K_{\Pi_{чорн}} = (s/s_o)(V/V_o) = k^{(1-y_v)}; \quad K_{\Pi_{чист}} = (s/s_o)(V/V_o) = k^{(1-y_t/z_t)} \quad (9)$$

З графіка, наведеного на рис. 6, випливає, що максимальна продуктивність обробки ($K_{\Pi} = 1$) має місце при $k = 1$, тобто при оптимальних режимах різання. При відхиленні режимів різання від оптимальних ($k < 1$), продуктивність різко зменшується. Підвищення подачі в порівнянні з оптимальною ($k > 1$) недоцільно, так як для чорнової обробки це приводить к перевищенню допустимої міцності пластини і можливому її руйнуванню; для чистової обробки – к завищенню допустимої шорсткості обробленої поверхні.

Наведені графіки дають можливість кількісно оцінювати зміни продуктивності внаслідок нераціонального вибору режимів різання. Так, якщо ступінь відхилення вибраних режимів різання від їх оптимальних значень $k = 0,7$, то можливе підвищення продуктивності за рахунок вибору оптимальних режимів під час чорнової обробки складає 25%, під час чистової – 35%.

Заключення

На підставі розробленої методики оптимізації режимів різання під час фрезерування з використанням метода лінійного програмування визначені оптимальні режими різання чорнової та чистової обробки торцевими твердосплавними фрезами, що забезпечують максимальну продуктивність. Для чистового фрезерування встановлені температурні обмеження та обмеження з шорсткості обробленої поверхні, обґрунтована необхідність врахування температурних обмежень.

Визначені аналітичні залежності оптимальних значень подачі і швидкості різання від параметрів процесу різання під час чорнового та чистового фрезерування. На їх підставі розроблені рекомендації з вибору оптимальних режимів різання для будь – яких

умов фрезерної обробки торцевими твердосплавними фрезами.

Запропонована методика кількісної оцінки можливостей підвищення продуктивності обробки за рахунок оптимізації режимів різання на підставі коефіцієнта зміни продуктивності обробки при відхиленні вибраних режимів— подачі та швидкості різання від їх оптимальних значень.

Список літератури:

1. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1989. – 296 с.
2. Оптимизация и управление процессом резания / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. – К.: УМК ВО, 1991. – 140 с.
3. Зантур Сахби. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений / Зантур Сахби, В.А. Богуславский, Т.Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. – 2010. – Вып. 39. – С.77-84.
4. Bogouslavskiy Vadim. Optimisation of cutting regimes at application of technological cutting fluid / Vadim Bogouslavskiy, Tatiana Ivchenko // ModTech International Conference 25-27th May 2011. – Vadul lui Voda: Chisinau, 2011. P. 669-672. (Index to Scientific & Technical Proceedings of Thomson Scientific - Institute for Scientific Information (ISI).
5. Ивченко Т.Г. Двохкритеріальна оптимізація режимів різання під час обробки чавунів інструментами з надтвердих матеріалів / Т.Г. Ивченко, Є.В. Полякова // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2011. – Вып. 41. – С.152-158.
6. Ивченко Т.Г. Исследование закономерностей распределения температур в лезвии торцовых фрез / Т.Г. Ивченко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. – 2009. – Вип. 24. – С.90 - 96.

Надійшла до редколегії 08.02.2012.

Т.Г. Ивченко

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОРЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ

С использованием критерия максимальной производительности определены оптимальные режимы резания черновой и чистовой обработки торцевыми твердосплавными фрезами. Установлены температурные ограничения и ограничения по шероховатости обработанной поверхности для чистового фрезерования. На основании установленных аналитических зависимостей определены оптимальные значения подачи и скорости резания от параметров процесса фрезерования, разработаны рекомендации по выбору оптимальных режимов резания для любых условий обработки. Дана количественная оценка возможностей повышения производительности обработки за счет оптимизации режимов резания.

Ключевые слова: фрезерование, производительность, скорость, подача, оптимизация, температура, шероховатость.

T.G. Ivchenko

INCREASE OF THE PRODUCTIVITY FACE MILLING FOR ACCOUNT OF CUTTING REGIME OPTIMIZATION

With the use of maximal productivity criteria, the optimum cutting regimes at face milling cutter from cemented- carbide composition are received. The limitations on the cutting temperature and roughness of the machined surfaces for draft and finishing face milling are set. Based on the certain analytical dependences of the optimum feed and cutting speed from the parameters of face milling recommendations on the choice of the optimum cutting regimes for any terms of machining are develop. The estimation of the possibility of the increase of the machining productivity for account of cutting regime optimization is executed.

Keywords: milling, productivity, speed, feed, optimization, temperature, roughness.