

УДК 621.9: 658.5

## ДВОХКРИТЕРІАЛЬНА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ОБРОБКИ ЧАВУНІВ ІНСТРУМЕНТАМИ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Івченко Т.Г., Полякова Є.В. (ДонНТУ, м. Донецьк, Україна)  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@mech.dgtu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgtu.donetsk.ua)

***Анотація.** З використанням критеріїв максимальної продуктивності і мінімальної собівартості визначені оптимальні режими різання під час тонкого точіння чавунів інструментами з надтвердих матеріалів. Встановлені закономірності зміни оптимальних значень подачі і швидкості різання від шорсткості обробленої поверхні і радіусів при вершині леза інструменту. Виконаний порівняльний аналіз оптимальних режимів різання, визначених за різними критеріями оптимізації.*

***Ключові слова:** оптимізація, продуктивність, собівартість, швидкість, подача, шорсткість, температура.*

**1. Вступ.** Одним з резервів підвищення ефективності сучасних технологічних процесів виготовлення деталей машин є оптимізація параметрів їх механічної обробки, у зв'язку з чим тема роботи, що представляється, присвячена оптимізації режимів різання при обробці чавунів інструментами з надтвердих матеріалів, вельми актуальна.

В даний час найбільш поширеними критеріями оптимізації є максимальна продуктивність або мінімальна собівартість обробки [1]. Під час чистової обробки, а також під час тонкої обробки інструментами з надтвердих матеріалів як обмеження рекомендується використання обмежень по шорсткості обробленої поверхні і по температурі різання [1].

Серед методів оптимізації найбільше знайшли методи лінійного і геометричного програмування (МЛП і МГП). Обов'язковою умовою використання МЛП є лінійність або можливість лінеаризації цільової функції і обмежень. У тому випадку, коли критерієм оптимізації є лінеаризуємий критерій максимальної продуктивності, доцільне використання МЛП [2]. У разі, коли критерієм оптимізації є нелінійний критерій мінімальної собівартості, необхідне використання МГП [2]. Як МЛП, так і МГП дозволяють здійснювати одночасну оптимізацію швидкості різання і подачі з обмежень, що діють під час різання.

Для МЛП досить добре розроблений і широко використовується графічний метод пошуку оптимальних режимів різання [4], а також запропоновані аналітичні залежності оптимальних режимів різання від умов обробки. Аналітичне рішення запропоноване і для МГП [5, 6]. Проте, всі отримані результати відносяться до обробки деталей із сталі і не враховують особливостей оброблюваності чавунів. Найбільші труднощі в оптимізації режимів різання для деталей з чавунів виникають у зв'язку з відсутністю достатньої кількості інформації з обмежень по шорсткості обробленої поверхні і по температурі різання під час тонкої обробки інструментами з надтвердих матеріалів. У зв'язку з цим представляє інтерес подальший розвиток МЛП і МГП стосовно оптимізації режимів різання для різних умов обробки деталей з чавунів, а також порівняння результатів визначення оптимальних режимів різання за різними критеріями.

Мета представленої роботи - визначити оптимальні режими різання, що забезпечують для заданих умов обробки і вимог до якості оброблених поверхонь максимальну продуктивність і мінімальну собівартість обробки під час тонкого точіння чавунів інструментами з надтвердих матеріалів.

**2. Основний зміст та результати роботи.** Під час оптимізації режимів різання за критерієм максимальної продуктивності з використанням МЛП як цільова функція

розглядається продуктивність обробки, обумовлена основним часом:  $t_o = L/nS$ . Максимум продуктивності досягається при мінімумі основного часу, або максимумі добутку  $n \cdot S \rightarrow \max$ .

Під час тонкої токарної обробки розглядаються обмеження по можливостях різального інструмента, обумовленою швидкістю різання, що відповідає його стійкості; по гранично припустимій шорсткості обробленої поверхні  $R_a$ ; по температурі різання; по гранично припустимих діапазонах частоти обертання  $n$  і подачі  $S$ .

Математична модель процесу різання внаслідок лінеаризації цільової функції й обмежень шляхом логарифмування виражається системою лінійних нерівнянь:

$$\begin{cases} X1 + y_V X2 \leq b_1, \\ k_3 X1 + k_2 X2 \leq b_2 \\ z_t X1 + y_t X2 \leq b_3, \\ X1 \geq b_4, X1 \leq b_5, \\ X2 \geq b_6, X2 \leq b_7, \\ (X1 + X2) \rightarrow \max, \end{cases} \quad \begin{cases} b_1 = \ln(1000 C_V K_V / \pi D T^m); \\ b_2 = \ln(1000^{k_3} R_a / k_o K_R (\pi D)^{k_3}); \\ b_3 = \ln(1000^{z_t} \Theta / C_\Theta K_\Theta (\pi D)^{z_t}); \\ b_4 = \ln S_{min}; b_5 = \ln S_{max}; \\ b_6 = \ln n_{min}; b_7 = \ln n_{max}; \\ X1 = \ln n; X2 = \ln S, \end{cases} \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр обробки,  $C_V, K_V$  – коефіцієнти і  $y_v, m$  – показники, що характеризують ступінь впливу подачі  $S$  і стійкості  $T$  на швидкість різання  $V$ , які визначаються в залежності від умов експлуатації;  $k_o, k_1, k_3$ , – коефіцієнт і показники, що характеризують ступінь впливу подачі  $S$  і швидкості  $v$  на шорсткість обробленої поверхні  $R_a$ , обумовлені умовами експлуатації;  $C_\Theta, K_\Theta$  – коефіцієнти для заданих умов обробки,  $n_t, y_t, x_t$  – показники ступеню, що відзначають вплив на температуру швидкості різання  $V$  та подачі  $S$ .

В результаті вирішення задачі оптимізації з використанням МЛП з урахуванням вказаних обмежень встановлені аналітичні залежності для визначення оптимальних значень подачі  $S_o$  і швидкості  $V_o$ :

$$S_{o1} = \begin{cases} \left[ \frac{\Theta (k_o K_R)^{\frac{z_t}{k_3}}}{C_\Theta K_\Theta R_a^{k_3}} \right]^{\frac{1}{(y_t k_3 - z_t k_1)}} & \text{якщо } \Theta < \Theta_o; \\ \left[ \frac{R_a T^{m k_3} t^{k_3 x_v}}{k_o K_R (C_V K_V)^{k_3}} \right]^{\frac{1}{(k_1 - y_v - k_3)}} & \text{якщо } \Theta > \Theta_o, \end{cases} \quad V_{o1} = \begin{cases} \left[ \frac{R_a}{k_o K_R S_o^{k_1}} \right]^{\frac{1}{k_3}} \\ \frac{C_V K_V}{T^m t^{x_v} S_o^{y_v}} \end{cases} \quad (3)$$

де  $\Theta_o$  – граничне значення температури різання, що визначає необхідність обліку температурних обмежень при розрахунку режимів обробки:

$$\Theta_o = C_\Theta K_\Theta \left[ \frac{R_a T^{m k_3}}{k_o K_R (C_V K_V)^{k_3}} \right]^{\frac{(y_t - y_v z_t)}{(k_1 - y_v k_3)}} \left( \frac{C_V \cdot K_V}{T^m \cdot t^{x_v}} \right)^{z_t}.$$

Приклади визначення оптимальних режимів різання приведені для тонкої токарної обробки деталей з чавуну СЧ20 (НВ 220) та зносостійкого чугуну (НВ 600) різцями, що оснащені кіборитом (геометричні параметри: передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , радіус при вершині  $r = 1$  мм; стійкість  $T = 100$ хв., глибина різання  $t = 1$  мм); шорсткість обробленої поверхні  $R_a = 1$  мкм, допустиме значення температури  $\Theta_{don} = 800^\circ\text{C}$ .

Для заданих умов обробки чавуну СЧ20 прийняті наступні коефіцієнти та показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на швидкість різання:  $C_V=53,33 \cdot 10^3$ ;  $K_V = 0,539$ ;  $x_v = 0,194$ ;  $y_v = 0,848$ ;  $m_v = 0,645$ ; коефіцієнти і показники, що характеризують ступінь впливу подачі, переднього кута, радіуса при вершині і швидкості на шорсткість обробленої поверхні:  $k_0 = 19,83$ ;  $k_1 = 1,15$ ;  $k_2 = 0,29$ ;  $k_3 = -0,18$  [3]. Гранична температура  $\Theta_0 = 343^\circ\text{C}$ . Оптимальні режими:  $X2_0 = -2,32$ ;  $X1_0 = 2,726$ ;  $n_0 = e^{X1_{opt}} = 15,272 \text{об/хв}$ ;  $S_0 = e^{X2_{opt}} = 0,098 \text{мм/об}$ ;  $V_0 = \pi D n_0 / 1000 = 1,1 \text{м/с}$ .

Згідно паспортним даним верстата прийняті наступні режими різання:  $n_0 = 200 \text{об/хв}$ ;  $S_0 = 0,2 \text{мм/об}$ ;  $V_0 = 130 \text{м/хв}$ .

Для заданих умов обробки зносостійких чавунів твердістю HB600 прийняті наступні коефіцієнти та показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на швидкість різання:  $C_V=13,007 \cdot 10^3$ ;  $K_V=0,686$ ;  $x_v = 0,194$ ;  $y_v = 0,484$ ;  $m_v = 0,645$ ; коефіцієнти і показники, що характеризують ступінь впливу подачі, переднього кута, радіуса при вершині і швидкості  $v$  на шорсткість обробленої поверхні:  $k_0 = 19,83$ ;  $k_1 = 1,15$ ;  $k_2 = -0,18$ ; коефіцієнти та показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на температуру різання:  $C_\Theta=481$ ;  $x_t = 0,1$ ;  $y_t = 0,19$ ;  $z_t = 0,3$  [3]. Граничне значення температури  $\Theta_0=904^\circ\text{C}$ . Оптимальні режими:  $X2_0 = -1,97$ ;  $X1_0 = 5,81$ ;  $n_0 = e^{X1_{opt}} = 334 \text{об/хв}$ ;  $S_0 = e^{X2_{opt}} = 0,139 \text{мм/об}$ ;  $V_0 = \pi D n_0 / 1000 = 210 \text{м/хв}$ .

Згідно паспортним даним верстата прийняті наступні режими різання:  $n_0 = 315 \text{об/хв}$ ;  $S_0 = 0,15 \text{мм/об}$ ;  $V_0 = 200 \text{м/хв}$ .

Під час оптимізації режимів різання за критерієм максимальної собівартості з використанням МГП як цільова функція приймається змінна частина собівартості обробки деталі інструментом за один прохід, що залежить від режимів різання:

$$C = C_{01} V^{-1} S^{-1} + C_{02} V^{k_V} S^{k_S}, \quad (3)$$

де  $C_{01} = A \frac{\pi D L}{1000}$ ;  $C_{02} = (A t_c + A_u) \frac{\pi D L}{1000 C_T} t^m$ ;  $k_V = 1/m - 1$ ;  $k_S = y/m - 1$ ;

$A$  – собівартість верстато-хвилини;  $A_u$  – вартість одного періода стійкості інструмента;  $t_0$  – основний час обробки;  $t_c$  – час зміни інструмента;  $T$  – стійкість інструмента;  $D, L$  – діаметр та довжина поверхні, що оброблюється;  $C_T$  – коефіцієнт  $x, y, m$  – показники, що характеризують ступінь впливу глибини, подачі і стійкості на швидкість різання.

Для тонкого точіння необхідно враховувати обмеження по гранично допустимій шорсткості обробленої поверхні  $R_a$ :

$$C_{11} S^{k_1} V^{k_3} \leq 1, \quad (4)$$

де  $k_0, k_1, k_3$  – коефіцієнт і показники, які характеризують ступінь впливу подачі  $S$ , радіуса при вершині  $r$ , швидкості  $V$  і переднього кута  $\gamma$  на шорсткість обробленої поверхні  $R_a$ ; коефіцієнт  $C_{11} = k_0 K_R / R_a$ .

Математична модель задачі оптимізації швидкості різання і подачі під час тонкого точіння представляється наступним чином:

1) пряма задача МГП - мінімізувати

$$g(V, S) = C_{01} V^{-1} S^{-1} + C_{02} V^{k_V} S^{k_S} \quad (5)$$

при обмеженнях  $V > 0, S > 0, C_{01} > 0, C_{02} > 0$ ;

2) двоїста задача МГП - максимізувати

$$V(W) = (C_{01}/W_{01})^{W_{01}} (C_{02}/W_{02})^{W_{02}} C_{11}^{W_{11}} \quad (6)$$

при обмеженнях  $W_{01} + W_{02} = 1$ ;  $-W_{01} + k_V W_{02} + k_3 W_{11} = 0$ ;  $-W_{01} + k_S 5W_{02} + k_1 W_{11} = 0$ .

В результаті вирішення задачі оптимізації з використанням МПП оптимальні подача  $S_o$  і швидкість різання  $V_o$  визначаються наступним чином:

$$S_{o2} = \left( \frac{W_{02} W_{01}^{k_V} V(W)_M^{k_V+1}}{M} \right)^{1/(k_S - k_V)} ; \quad V_{o2} = \left( \frac{W_{01}^{k_S} W_{02} V(W)_M^{k_S+1}}{M} \right)^{1/(k_V - k_S)} , \quad (7)$$

де  $M = (t_c + A_u/A) t^{\frac{x_v}{m}} / C_T$ ,  $V(W)_M = \left( \frac{1}{W_{01}} \right)^{W_{01}} \left( \frac{M}{W_{02}} \right)^{W_{02}} C_{11}^{W_{11}}$ ;

$$W_{01} = \frac{k_S k_3 - k_V k_1}{k_S k_3 - k_V k_1 + k_3 - k_1} ; \quad W_{02} = \frac{k_3 - k_1}{k_S k_3 - k_V k_1 + k_3 - k_1} ; \quad W_{11} = \frac{W_{01} - k_V (1 - W_{01})}{k_3} .$$

Приклад розрахунку оптимальних режимів різання, що забезпечують мінімальну собівартість для тонкого розточування сірого чавуну СЧ20 (НВ 220). Для цих умов прийнято: собівартість верстата - хвилини  $A = 5$  коп/хв., вартість одного періоду стійкості інструмента  $A_u = 25$  коп; час зміни інструменту  $t_c = 5$  мин. Для тонкого точіння використовуються різці, оснащені кіборітом (передній кут  $\gamma = -10^\circ$ , радіус при вершині  $r = 0,5$  мм); глибина різання  $t = 1$  мм; необхідна шорсткість поверхні  $R_a = 1$  мкм.

Для зазначених умов обробки прийняті наступні коефіцієнти і показники:  $C_T = 53,33$ ,  $k_V = 0,55$ ,  $k_S = -0,25$  [3]. Коефіцієнти і показники, які характеризують ступінь впливу подачі, переднього кута, радіуса при вершині і швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні:  $k_0 = 19,83$ ;  $k_1 = 1,15$ ;  $k_3 = -0,18$ . Розрахункові значення коефіцієнтів  $C_{01} = 13,006$ ,  $C_{02} = 6,361$ ;  $C_{11} = 29,339$ . Коефіцієнти вагомості, визначені у відповідність з формулою (7):  $W_{01} = 0,306$ ;  $W_{02} = 0,639$ ,  $W_{11} = 0,417$ .

Оптимальні значення подачі і швидкості різання, розраховані у відповідність з формулами (7), дорівнюють:  $S_o = 0,075$  мм/об,  $V_o = 0,9$  м/мин.

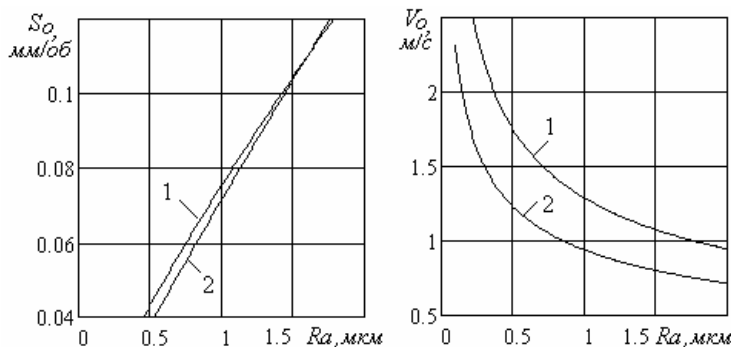


Рис. 1. Графіки порівняння залежності оптимальних режимів різання від шорсткості поверхні при розрахунку: 1 - методом лінійного програмування; 2 - методом геометричного програмування

При визначенні оптимальних режимів різання за двома різними критеріями оптимальності – максимальної продуктивності та мінімальної собівартості виникає необхідність порівняння отриманих результатів. На рис. 1, 2 представлені графіки залежності оптимальних режимів різання від шорсткості поверхні та глибини різання при розрахунку методом лінійного програмування (критерій максимальної продуктивності) та методом геометричного програмування (критерій мінімальної собівартості).

В результаті порівняння встановлено, що більший рівень мають як оптимальна подача так і швидкість різання, які розраховані за критерієм максимальної продуктивності методом лінійного програмування.

На підставі встановлених аналітичних залежностей для визначення оптимальних режимів різання можуть бути розраховані коефіцієнти зміни собівартості  $K_C$  і продуктивності  $K_{II}$  обробки при відхиленні вибраних режимів різання від їх

оптимальних значень  $S = kS_o$ ,  $V = kV_o$ . ( $k$  – ступінь відхилення):

$$K_C = \frac{C_{01}V^{-1}S^{-1} + C_{02}V^{k_V} S^{k_S}}{C_{01}V_{o1}^{-1}S_{o1}^{-1} + C_{02}V_{o1}^{k_V} S_{o1}^{k_S}}; \quad K_{II} = \frac{VS}{V_{o2}S_{o2}}, \quad (8)$$

де  $S_{o1}$ ,  $V_{o1}$  – режими різання, оптимальні за критерієм мінімальної собівартості;  $S_{o2}$ ,  $V_{o2}$  – за критерієм максимальної продуктивності.

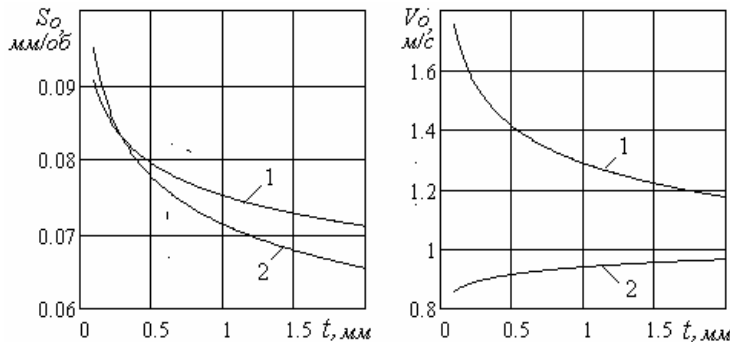


Рис. 2. Графіки порівняння залежності оптимальних режимів різання від глибини різання при розрахунку: 1 - методом лінійного програмування; 2 - методом геометричного програмування

З обліком вказаних раніше переутворень ці коефіцієнти можуть бути представлені:

$$K_C = \left[ \frac{W_{01}V(W)(gk)^{\frac{k_1W_{11}}{k_3}} + M \left[ W_{01}V(W)(gk)^{\frac{k_1W_{11}}{k_3}} \right]^{-k_V} (sgk)^{k_S - k_V}}{V(W)} \right]; \quad (9)$$

$$K_{II} = \begin{cases} k^{(1-yv)}, & \text{якщо } k \leq 1 \\ \frac{(k_1 - k_1 k_3)}{k \quad k_3} \end{cases}, \quad (10)$$

де  $g = S_{o2}/S_{o1}$  – співвідношення подач, розрахованих за критеріями мінімальної собівартості та максимальної продуктивності.

Графіки, представлені на рис. 3, свідчать про те, що максимальна продуктивність обробки ( $K_{II} = 1$ ) має місце при  $k = 1$ , тобто при оптимальних режимах різання. При відхиленні режимів різання, як в меншу, так і в більшу сторону від оптимальних, продуктивність зменшується. У порівнянні з режимами різання, що забезпечують максимальну продуктивність, режими, при яких досягається мінімальна собівартість ( $K_C = 1$ ), значно нижче:  $k = 0,85$ . При відхиленні режимів різання, як в меншу, так і в більшу сторону від оптимальних, собівартість збільшується.

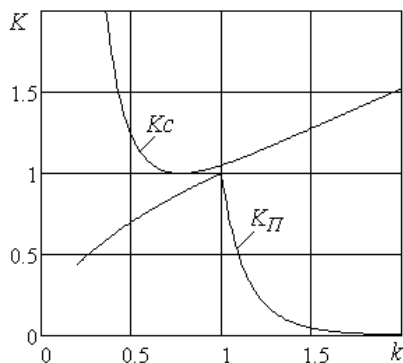


Рис. 3. Залежність коефіцієнтів зміни собівартості  $K_C$  і продуктивності  $K_{II}$  обробки від ступеня відхилення режимів різання від оптимальних  $k$

При роботі на режимах, що забезпечують мінімальну собівартість, втрати продуктивності складають 25%. При роботі на режимах, що забезпечують максимальну продуктивність, втрати собівартості не перевищують 5%.

Таким чином, з використанням запропонованої методики можливе кількісне

порівняння оптимальних режимів різання, визначених за різними критеріями.

**3. Висновки.** В результаті проведених досліджень визначені аналітичні залежності для розрахунку оптимальних режимів різання за критеріями максимальної продуктивності та мінімальної собівартості з використанням в якості метода оптимізації як лінійного, так і геометричного програмування.

Представлена методика дозволяє для будь-яких умов обробки та заданих вимог до якості оброблених поверхонь виконувати розрахунки оптимальних режимів різання, що забезпечують як мінімальну собівартість, так і максимальну продуктивність тонкого точіння чавунів інструментами з надтвердих матеріалів.

На підставі встановлених коефіцієнтів зміни собівартості і продуктивності обробки при відхиленні вибраних режимів різання від їх оптимальних значень виконане порівняння результатів визначення оптимальних режимів різання за різними критеріями. Розроблена методика визначення оптимальних режимів різання може бути використана для будь-яких видів механічної обробки.

**Перелік літератури:** 1. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. - М.: Машиностроение. 1989. - 296с. 2. Оптимизация и управление процессом резания: / О.С. Кроль, Г.Л. Хмеловский. – К.: УМК ВО, 1991. – 140с. 3. Лезвийный инструмент из сверхтвердых материалов: Справ./ Под ред. Н.В. Новикова. - К.:Техніка.1988.-108с. 4. Зантур Сахби, Богуславский В.А., Ивченко Т.Г. Оптимизация режимов резания при точении труднообрабатываемых материалов с учетом температурных ограничений // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. – С.77-84. 5. Т.Г.Ивченко, Е.Е. Шальская. Повышение эффективности применения сверхтвердых инструментальных материалов за счет оптимизации режимов резания. Известия ТТИ ЮФУ – ДонНТУ. Материалы одиннадцатого научно-практического семинара “Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы”: - Таганрог: ТТИ ЮФУ. Кн.3. 2010.№ 10. – С. 158-163. 6. Ивченко Т.Г., Шальская Е.Е. Оптимизация режимов резания при чистовом и тонком точении методом геометрического программирования // Прогрессивные технологии и системы машиностроения:– Донецк: ДонНТУ, 2010. Вып. 39. – С.91-97.

#### **TWOCRITERION OPTIMIZATION OF OF CUTTING MODES AT TREATMENT OF CAST-IRONS BY FROM SUPERHARD MATERIALS**

*Ivchenko T.G., Polyakova E.V. (DonNTU, t. Donetsk, Ukraine)*

**Abstract:** With the use of criteria of burst performance and minimum prime price the optimum modes of cutting at the thin sharpening of cast-irons by instruments from superhard materials are certain. Conformities to law of change of optimum values of serve and cutting speed from the the treated surface roughness and radiuses at the top of tool blade are set. The comparative analysis of the optimum cutting modes certain on the different criteria of optimization is executed.

**Key words:** optimization, productivity, speed, feed, roughness, temperature.

#### **ДВУХКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЧУГУНОВ ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Ивченко Т.Г., Полякова Е.В. (ДонНТУ, г. Донецк, Украина)*

**Аннотация:** С использованием критериев максимальной производительности и минимальной себестоимости определены оптимальные режимы резания при тонком точении чугунов инструментами из сверхтвердых материалов. Установлены закономерности изменения оптимальных значений подачи и скорости резания от шероховатости обработанной поверхности и радиусов при вершине лезвия инструмента. Выполнен сравнительный анализ оптимальных режимов резания, определенных по различным критериям оптимизации.

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

Надійшла до редколегії 21.12.2010.