

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

В. А. Дербаба, О. О. Богданов

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів ступеня магістра освітньо-наукової програми
«Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва»
спеціальності 131 Прикладна механіка

Дніпро
НТУ «ДП»
2025

Дербаба В. А.

Оптимізація режимів різання на верстатах з ЧПК [Електронний ресурс] : методичні рекомендації до виконання практичних робіт для здобувачів ступеня магістра освітньо-наукової програми «Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва» спеціальності 131 Прикладна механіка / В. А. Дербаба, О. О. Богданов ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. – 44 с.

Автори:

В. А. Дербаба, канд. техн. наук, доц.

О. О. Богданов, канд. техн. наук, доц.

Затверджено науково-методичною комісією спеціальності 131 Прикладна механіка (протокол № 8 від 18.12.2024) за поданням кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства (протокол № 12 від 20.11.2024).

Подано методичні рекомендації до виконання практичних робіт з дисципліни «Оптимізація режимів різання на верстатах з ЧПК» здобувачами ступеня магістра спеціальності 131 Прикладна механіка (освітньо-наукова програма «Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва»).

Викладено методику визначення оптимальних режимів різання технологічних операцій механічної обробки.

Відповідальний за випуск завідувач кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства В. А. Дербаба, канд. техн. наук, доц.

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ	4
1. Практична робота № 1.	
Визначення оптимальних режимів різання при точінні	6
2. Практична робота № 2.	
Визначення оптимальних режимів різання при свердлінні	19
3. Практична робота № 3.	
Визначення оптимальних режимів різання при фрезеруванні	27
КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ	42
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ.....	43

ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

Методичні рекомендації розроблені для дисципліни «Оптимізація режимів різання на верстатах з ЧПК», яка є важливим компонентом підготовки магістрів за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» (освітньо-наукова програма «Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва»).

Мета дисципліни – формування компетентностей з теоретичних знань та практичних вмінь визначення оптимальних режимів різання на верстатах з ЧПК.

Дисципліна «Оптимізація режимів різання на верстатах з ЧПК» призначена для створення у здобувачів вищої освіти компетенцій з оптимального управління процесами оброблення деталей на верстатах з ЧПК. Ця дисципліна забезпечує здобувачів необхідними знаннями для підвищення ефективності технологічних процесів обробки та оптимізації роботи верстатного обладнання.

В процесі вивчення цієї дисципліни здобувач оволодіває загальним математичним апаратом оптимального управління, формулюванням задачі оптимізації, вибором критеріїв, обмежень та методами розв’язання таких задач. Розглядаються вирішення задач оптимізації токарного оброблення, циліндричного та торцевого фрезерування, свердління. Практичні задачі оптимізації прив’язані до оброблення на верстатах з ЧПК.

Режим різання, що розрахований за традиційною методикою, яка ґрунтується на послідовному визначенні глибини різання, подачі та швидкості різання, не може бути оптимальним, тому що він розрахований в основному для максимального використання тільки різальних властивостей інструменту.

При роботі за один прохід, коли глибина різання дорівнює припуску на обробку, режим різання буде оптимальним, якщо вибрані такі комбінації подачі та числа обертів шпинделя, коли прийнятий критерій оптимальності досягне мінімуму чи максимуму. Оптимальний режим різання знаходять за умови врахування відомих фізичних зв’язків між окремими параметрами режиму та заданими обмеженнями, що визначаються верстатом і технологічними вимогами до обробки.

Як критерій оптимальності найчастіше використовують локальні критерії, наприклад, стійкість інструменту, основний технологічний час обробки,

собівартість операції, але завжди є можливість застосування й інших критеріїв.

При використанні ЕОМ режим різання знаходять за допомогою методу лінійного програмування, суть якого пояснена далі.

Одне з найбільш поширених завдань – пошук оптимальних умов функціонування системи різання. Процедура пошуку складається з таких дій:

- встановлення меж технологічної системи, всередині яких можуть знаходитися експериментальні значення або формування набору технічних обмежень;

- визначення цільового кількісного критерію оптимізації або цільової функції, на основі яких можливо провести аналіз варіантів з метою визначення найкращого;

- побудова математичної моделі, яка відображає взаємозв'язки між змінними та являє собою сукупність рівнянь і нерівностей, що відображають цільову функцію та обмеження.

Залежно від кількості цільових функцій розрізняють одно- та багатокритеріальні оптимізаційні завдання, а від виду цільової функції та обмежень – оптимізаційні завдання лінійні й нелінійні.

1. Практична робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПРИ ТОЧІННІ

Мета роботи: опанувати методику визначення оптимальних режимів різання при точінні, що забезпечують найбільш економічну обробку заготовок при заданих технічних обмеженнях.

Оптимальним режимом різання є таке поєднання *глибини, подачі і швидкості різання* (рис. 1), при якому механічна обробка заготовки виконується найбільш економічно при дотриманні вимог до точності, шорсткості і якості оброблених поверхонь. Розрахунок оптимальних режимів різання являє собою складну техніко-економічну багатофакторну варіаційну задачу, рішення якої найбільш ефективно реалізується з використанням ЕОМ і математичних методів програмування. В якості критерію оптимальності прийнята мінімальна собівартість обробки.

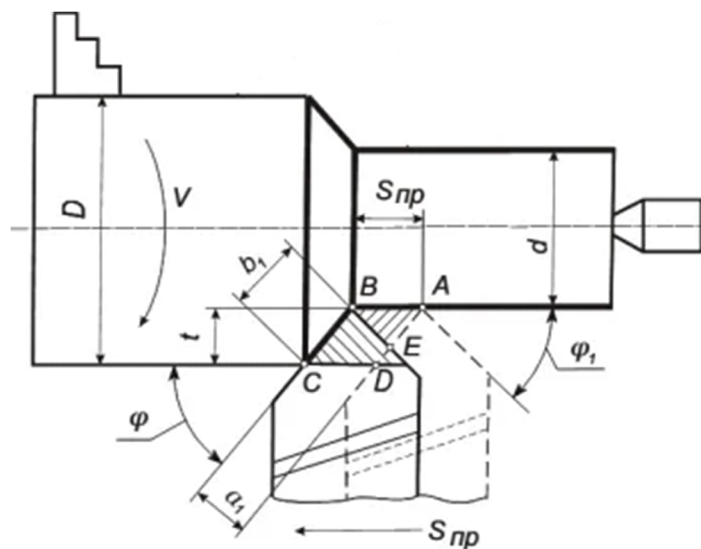


Рисунок 1 – Параметри режимів різання

Вибір тих чи інших технічних обмежень залежить від виду обробки і визначається конкретними умовами технологічного, конструкційного і виробничого характеру. Розглянуто задачу двопараметричної оптимізації режимів різання (швидкості різання і подачі) на останньому проході, тому глибина різання t повинна бути обрана заздалегідь:

- при чистовому точінні, якщо шорсткість обробленої поверхні становить $Ra = 0,63 \div 2,5$ мкм, глибина різання вибирається в межах $t = 0,05 \div 0,2$ мм; якщо $Ra \geq 2,5$ мкм, то глибина різання становить $t = 0,2 \div 1,2$ мм.

- при чорновому точінні припуск h , як правило, повинен віддалятися за один прохід, тобто $t = h$. В додатку 1 наведені чисельні значення припусків $h_{\text{табл}}$, що видаляються за один прохід, при обробці заготовок з круглого сталевго прокату. При використанні заготовок, отриманих іншими технологічними способами, величину $h_{\text{табл}}$ коригують на підставі наведених співвідношень до значення h_0 : для виливків $h_0 = (1,5 \div 1,6) \cdot h_{\text{табл}}$; для поковок $h_0 = (1,2 \div 1,4) \cdot h_{\text{табл}}$; для попередньо оброблених заготовок $h_0 = (0,7 \div 0,8) \cdot h_{\text{табл}}$.

Рекомендується наступний порядок вибору глибини різання при чорновому точінні:

- визначається припуск на обробку h як напіврізниця між розміром заготовки D і деталі d : $h = (D-d) / 2$;

- за додатком 1 визначається табличне значення припуску $h_{\text{табл}}$ або h_0 для різних видів заготовок;

- розраховується число проходів $i = h / h_{\text{табл}}$ або $i = h / h_0$ з округленням до цілого;

- визначається шукана глибина різання $t = h / i$, яка використовується в розрахунку.

Таблиця 1 – Величини припусків $h_{\text{табл}}$ (мм), які видаляються за один прохід, при обробці заготовок з круглого сталього прокату

Діаметр заготовки, мм	Довжина вала				
	До 100	100 - 400	400 - 800	800 - 1200	1200 - 1600
6 – 18	1,5	1,6	2,0	-	-
18 – 30	1,8	1,9	2,3	2,3	2,5
30 – 50	2,0	2,3	2,6	2,8	3,0
50 – 80	2,2	2,5	2,8	3,2	3,4
80 – 120	2,8	3,0	3,3	3,6	4,2
120 – 200	3,0	3,5	3,8	4,3	4,5

Формування системи обмежень

1. Обмеження відносно різальних можливостей інструменту

Для формування цього обмеження використаємо відомі залежності:

$$V_P \leq V_T ,$$

де V_P – швидкість різання при точінні, що є коловою швидкістю точки, яка знаходиться на найбільшому діаметрі заготовки, м/хв; V_T – швидкість різання, що лімітована стійкістю інструменту.

Цим швидкостям відповідають такі формули:

$$V_P = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} ,$$

$$V_T = \frac{C_v \cdot k_v}{T^m \cdot t^x \cdot S^{yv}} ,$$

де C_v, k_v – константи, що враховують умови роботи інструменту в довідковому та конкретному варіантах; D – діаметр оброблюваної поверхні, мм; T – період стійкості, хв; S – подача, мм/об; n – частота обертання, об/хв; x, m, yv – показники степеня, що відображають вплив на швидкість різання глибини, стійкості та подачі.

Порівнявши праві частини залежностей і зробивши відповідні перетворення, зводимо це обмеження до явного вигляду:

$$n \cdot S^{yv} \leq \frac{318 \cdot C_v \cdot k_v}{T^m \cdot t^x \cdot D} . \quad (1.1)$$

2. Обмеження відносно потужності електродвигуна приводу головного руху верстата

Це обмеження пов'язує головну складову сили різання, що виникає при точінні, із потужністю на шпинделі верстата. Для здійснення процесу різання необхідно виконати умову:

$$N_{P3} \leq N_{ШП} ,$$

де N_{P3} – потужність, що витрачається на різання, кВт; $N_{ШП}$ – потужність на шпинделі верстата, кВт.

Дані потужності розраховуються за такими формулами:

$$N_{Pz} = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60},$$

$$N_{III} = N_{BP} \cdot \eta,$$

де P_z – тангенціальна складова сили різання, Н; N_{BP} – потужність приводу головного руху верстата, кВт; η – ККД приводу.

Порівнявши праві частини останніх двох залежностей і зробивши відповідні перетворення, зводимо це обмеження до явного вигляду:

$$n^{n+1} \cdot S^y \leq \frac{6120 \cdot 1000^{n+1} \cdot N_{BP} \cdot \eta}{C_p \cdot t^x \cdot (\pi \cdot D)^{n+1} \cdot k_p}. \quad (1.2)$$

3. Обмеження відносно сили, що допускається міцністю слабкої ланки механізму подачі верстата

Це обмеження в загальному вигляді можна записати так:

$$P_x \leq [P_{BP}],$$

де P_x – складова сили різання у напрямку подачі, Н; $[P_{BP}]$ – максимально допустима сила подачі верстата, Н.

Обмеження в явному вигляді буде:

$$n^n \cdot S^y \leq \frac{[P_{BP}] \cdot 1000^n}{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot (\pi \cdot D)^n \cdot k_p} \quad (1.3)$$

4. Обмеження відносно міцності державки різця

Згинальний момент, що діє на державку різця, визначається за формулою

$$M_B = P_z \cdot l_p,$$

де P_z – тангенціальна складова сили різання, Н; l_p – виліт корпусу різця, $l_p = (1,0 \dots 1,5) \cdot H$, тут H – висота різця.

Напруження вигину в державці має співвідношення:

$$\sigma_{\text{н}} = M_B / W_D \leq [\sigma_{\text{н}}],$$

де $[\sigma_H]$ – допустиме напруження для корпусів із конструкційної сталі, $[\sigma_H] = 100 \dots 250$ МПа; W_D – момент опору перерізу державки.

Моменти опору різного перерізу державки різців мають для розрахунку свою формулу:

$W = B \cdot H^2 / 6$ – для різців прямокутного перерізу (B – ширина корпусу різця);

$W = B^3 / 6$ – для різців квадратного перерізу;

$W = 0,1 \cdot d^3$ – для різців круглого перерізу (d – діаметр корпусу різця).

Підставивши відповідні значення та зробивши необхідні перетворення, зводимо обмеження до явного вигляду:

$$n^n \cdot S^y \leq \frac{1000^n \cdot W_D \cdot [\sigma_H]^n}{10 \cdot C_P \cdot t^x \cdot (\pi \cdot D)^n \cdot k_P \cdot l_P \cdot k_3}, \quad (1.4)$$

де k_3 – коефіцієнт запасу міцності.

5. Обмеження відносно міцності пластини різальної частини різця

При використанні швидкорізальної інструментальної сталі це обмеження розрахунках не враховується. В інших випадках для заданих значень товщини пластини C_H і головного кута в плані φ це обмеження являє собою нерівність

$$S^y \leq \frac{34 \cdot C_H^{1,25} \cdot (\sin 60^\circ / \sin \varphi)^{0,8}}{C_P \cdot t^{(x-0,77)} \cdot k_P}. \quad (1.5)$$

6. Обмеження відносно шорсткості обробленої поверхні

При токарній обробці шорсткість обробленої поверхні в основному визначається подачею. Існує навіть така технічна термінологія: подача граничної шорсткості. Виходячи з умови, що подача на операції не повинна перевищувати граничну, одержимо формулу обмеження відносно шорсткості:

$$S \leq \frac{C_H \cdot R_Z^y \cdot r^u}{t^x \cdot \varphi^z \cdot \varphi_1^z}, \quad (1.6)$$

де C_H – коефіцієнт, що характеризує нормативні умови обробки; Rz – висота мікронерівностей на обробленій поверхні; r – радіус при вершині різця; t – глибина різання; φ, φ_1 – відповідно головний та допоміжний кути в плані.

Числові значення коефіцієнта C_H і показників степенів x, y, z та u наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Числові значення коефіцієнта C_H та показників степені у формулі (1.6)

Матеріал, що оброблюється	Подача S	C_y	x	y	z	u
Сталі та сталеве литво	$< 1,75$	0,008	0,30	1,40	0,35	0,70
	$> 1,75$	0,170	0,12	0,60	0,15	0,30
Чавун	$< 1,60$	0,045	0,25	1,25	0,50	0,75
	$> 1,60$	0,290	0,12	0,60	0,25	0,35

7. Обмеження відносно точності обробки, що визначається жорсткістю технологічної системи

Унаслідок прогину деталі під дією сили різання точність обробки може значно погіршуватися. Результируюча сила, що спричиняє прогин деталі, підраховується за формулою

$$P_{zy} = \sqrt{P_z^2 + P_y^2}.$$

Силу P_y можна визначити через силу P_z , використовуючи коефіцієнт пропорційності $\eta = 0,4 \dots 0,5$.

$$\text{Тоді } P_{zy} = P_z \sqrt{1 + \eta^2}.$$

Запишемо формулу максимальної стріли прогину деталі

$$f = \frac{P_{zy} \cdot l^3}{K_3 \cdot E \cdot I} \quad \text{або} \quad f = \frac{P_z \sqrt{1 + \eta^2} \cdot l^3}{K_3 \cdot E \cdot I},$$

де l – довжина деталі; K_3 – коефіцієнт, що залежить від способу закріплення деталі, при закріпленні деталі в центрах $K_3 = 100$, в патроні та задньому центрі $K_3 = 140$, при консольному закріпленні в патроні $K_3 = 2,4$; E – модуль пружності матеріалу заготовки; $I = 0,05 \cdot d^4$ – полярний момент інерції.

Допустима стріла прогину f_{don} визначається точністю обробки деталі. Щоб не вийти за межі допуску на діаметр деталі, необхідно виконати умову $f_{don} \geq f$.

Допустима стріла прогину $f_{don} \leq 0,05 \cdot \Delta$, де Δ – допуск на розмір.

Використовуючи зв'язок сили P_z з режимами різання і підставляючи допустиму стрілу прогину, одержимо загальне обмеження для деталі:

$$n^n \cdot S^y \leq \frac{1000^m \cdot K_3 \cdot E \cdot I \cdot f_{don}}{10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot (\pi \cdot D)^n \cdot k_p \cdot l^3 \sqrt{1 + \eta^2}} . \quad (1.7)$$

8. Обмеження відносно значення мінімальної подачі, що допускається верстатом:

$$S \geq S_{min} . \quad (1.8)$$

9. Обмеження відносно максимальної подачі:

$$S \leq S_{max} . \quad (1.9)$$

10. Обмеження відносно значення мінімальної частоти обертання шпинделя верстата:

$$n \geq n_{min} . \quad (1.10)$$

11. Обмеження відносно значення максимальної частоти обертання:

$$n \leq n_{max} . \quad (1.11)$$

Обмеження 8–11 є кінематичними обмеження, що обумовлені можливостями верстата.

Вибір цільової функції

Для більшості виробничих ситуацій як цільову функцію доцільно вибирати найменший машинний час обробки t_m :

– для визначення продуктивності процесу

$$f = t_m = L / n \cdot S,$$

– при розгляді одиничної довжини обробки L

$$f = t_m = 1 / n \cdot S.$$

Для більш складних цільових функцій на прикладі собівартості двопрхідної токарної обробки цільова функція набуває вигляду тримірної поверхні.

Для того, щоб $t_m = L / n \cdot S$ було мінімальним, необхідно мати добуток $n \cdot S$ максимальним. Тому як оціночна може бути прийнята така функція:

$$f = n \cdot S = \max.$$

Розробка математичної моделі процесу різання при точінні

Поєднавши одержані обмеження (1.1) – (1.11) в систему, будемо мати математичну модель процесу обробки. Ця модель описує всі важливі для розв'язку поставленої задачі параметри зв'язки, що підлягають оптимізації, з показниками операції та враховує технологічні можливості системи. Система обмежень і цільова функція – нелінійні.

Для того, щоб систему обмежень та цільову функцію звести до лінійної форми, логарифмуємо одержані вирази. Позначивши $\ln n = x_1$; $\ln S = x_2$ та праві частини виразів через b_i з відповідними індексами, одержимо математичну модель оптимального режиму різання:

$$\left. \begin{array}{rcl} x_1 + y_v x_2 & \leq & b_1 \\ (n_p + 1) 5x_1 + y_p x_2 & \leq & b_2 \\ nx_1 + yx_2 & \leq & b_3 \\ nx_1 + yx_2 & \leq & b_4 \\ yx_2 & \leq & b_5 \\ x_2 & \leq & b_6 \\ nx_1 + yx_2 & \leq & b_7 \\ x_2 & \geq & b_8 \\ x_2 & \leq & b_9 \\ x_1 & \geq & b_{10} \\ x_1 & \leq & b_{11} \\ f_o = (x_1 + x_2) & \rightarrow & \max \end{array} \right\} A,$$

де $x_1 = \ln n$; $x_2 = \ln S$.

Неважко впевнитися, що в логарифмічних координатах система обмежень та цільова функція становляться лінійними.

Графічна інтерпретація та визначення оптимальних режимів різання

Для знаходження оптимальних значень числа обертів за хвилину $n_{\text{опт}}$ і оптимальної подачі $S_{\text{опт}}$ графічним методом необхідно побудувати багатокутник можливих розв'язків системи обмежень, що входять у систему A . На рис. 2 у подвійних логарифмічних шкалах зображені прямі нерівностей системи A і виділена область можливих розв'язків $ABCD$ цієї системи, що відповідає змісту її нерівностей. Граничні прямі AB , BC , CD і DA , пересікаючись між собою, утворюють багатокутник, кожна з точок всередині якого задовольняє нерівності всіх граничних прямих системи A , що його утворюють.

Для знаходження оптимального сполучення елементів $\{n, S\}$ слід визначити, в якій з точок шуканого багатокутника $ABCD$ лінійна функція двох перемінних $f_0 = (x_1 + x_2)$ буде приймати максимальне значення.

Для цього необхідно переміщувати пряму f_0 паралельно самій собі у напрямку від початку координат. На рис. 2 у вершині багатокутника C цільова функція f_0 набуває найбільшого значення. Отже, вершина C є точкою оптимуму, а її координати x_1 та x_2 – оптимальним розв'язком моделі A .

Після визначення координат x_1 і x_2 обчислюються оптимальні значення елементів режиму різання

$$\begin{aligned} n &= e^{x_1} , \\ S &= e^{x_2} . \end{aligned}$$

Завдання № 1.

Визначити оптимальні режими обробки при точінні заготовки.

На токарно-гвинторізному верстаті 16К20 проводиться чорнове обточування на прохід вала $D=68$ мм до $d=62h12$ мм. Довжина оброблюваної поверхні 280; довжина вала $l_1=430$ мм. Заготовка - кування зі сталі 40Х с межею міцності $\sigma_b=700$ МПа. Спосіб кріплення заготовки - у центрах та повідковому патроні. Параметр шорсткості поверхні $Ra=12,5$ мкм.

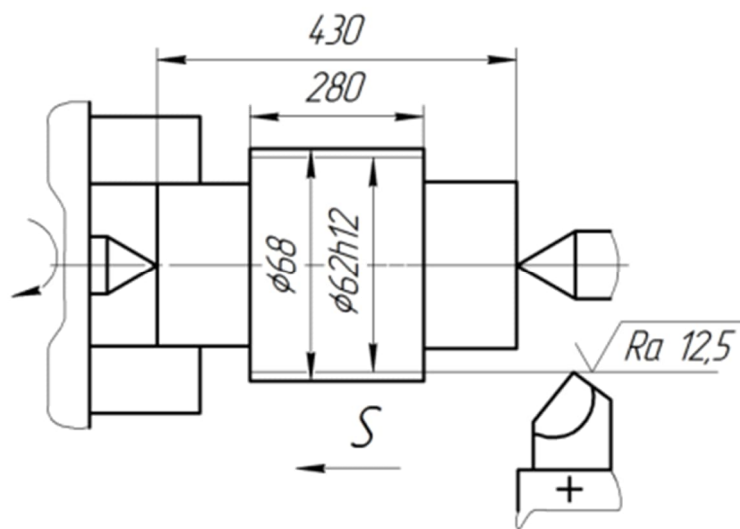


Рисунок 3 – Схема обробки

Паспортні дані верстатів та варіанти завдань приведені в таблицях 3 та 4.

Таблиця 3 – Паспортні дані токарних верстатів

Модель верстата	Потуж- ність приво- ду N, кВт	ККД приво- ду η	Допусти- ме тягове зусилля, Н	n _{верст} , об/хв		S _{0верст} мм/об	
				min	max	min	max
1A616П	4,0	0,72	4800	0	1800	0,037	0,52
1Ф616К	2,8	0,76	3600	18	1800	0,065	0,91
1A616Ф3	4,0	0,80	4200	0	1800	0,037	0,52
16Б16П	6,3	0,7	6000	20	2000	0,05	2,8
1М620	14,0	0,70	7000	12	3000	0,076	4,46
163	14,0	0,72	6600	10	1250	0,10	3,20
165	28,0	0,70	8000	5	600	0,20	3,05
1К62	10,0	0,76	6800	12,5	2000	0,075	4,46
1К620	10,0	0,82	6600	12	3000	0,07	4,16
16К20	10,0	0,84	8000	12,5	1600	0,05	2,80
16К20В	5,5	0,82	7300	16	2000	0,05	2,80
16К40	18,5	0,71	7600	6,3	1250	0,06	1,0
16К20Ф3С32	11,0	0,82	7600	160	2240	0,01	4,0
16К30Ф3	22,0	0,74	10000	6,3	1250	0,01	3,20
16К20РФ3С19	11,0	0,83	8000	160	2240	0,01	2,0

Таблиця 4 – Варіанти завдань до практичної роботи № 1

Номер варіанта	Заготовка, матеріал і його властивості	Вид обробки й параметр шорсткості	D, мм	d, мм	l, мм
1	2	3	4	5	6
1	Прокат. Сталь, $\sigma_b=500$ МПа	Обточування на прохід Ra=12,5 мкм	90	82h12	260
2	Виливок з кіркою. Сірий чавун СЧ 20, HB160	Обточування на прохід Ra=12,5 мкм	120	110h12	310
3	Кування. Сталь 12X18H19T, HB180	Обточування в упор Ra=1,6 мкм	52	50e9	400
4	Прокат. Сталь 14X17H2, HB200	Розточування в упор Ra=3,2 мкм	90	93H11	30
5	Виливок без кірки СЧ30, HB220	Розточування на прохід Ra=3,2 мкм	80	83H11	50
6	Виливок з кіркою. Сірий чавун СЧ 20, HB210	Розточування на прохід Ra=12,5 мкм	120	124H12	100
7	Прокат. Сталь 38 ХА, $\sigma_b=680$ МПа	Обточування на прохід Ra=12,5 мкм	76	70h12	315
8	Оброблена. Сталь 35, $\sigma_b=560$ МПа	Розточування на прохід Ra=3,2 мкм	97	100H11	75
9	Виливок з кіркою. Сірий чавун СЧ 20, HB210	Обточування в упор Ra=12,5 мкм	129	120h12	340
10	Оброблена. Сірий чавун СЧ10, HB160	Підрізання суцільного торця Ra=12,5 мкм	80	0	3,5
11	Кування. Сталь 40ХН, $\sigma_b=700$ МПа	Розточування на прохід Ra=3,2 мкм	77	80H11	45
12	Оброблена. Сталь Ст3, $\sigma_b=600$ МПа	Підрізання суцільного торця Ra=12,5 мкм	90	0	5
13	Прокат. Сталь 40Х, $\sigma_b=750$ МПа	Обточування в упор Ra=0,8 мкм	68	62e9	250
14	Оброблена. Сталь Ст5, $\sigma_b=600$ МПа	Розточування на прохід Ra=12,5 мкм	73	80H12	35
15	Виливок з кіркою. Сірий чавун СЧ 20, HB180	Обточування на прохід Ra=12,5 мкм	62	58h12	210
16	Виливок з кіркою. Сірий чавун СЧ 20, HB200	Підрізання втулки Ra=3,2 мкм	80	40	2,5
17	Кування. Сталь 20Х, $\sigma_b=580$ МПа	Розточування наскрізне Ra=1,6 мкм	48	50H9	50
18	Оброблена. Сталь 50, $\sigma_b=750$ МПа	Підрізання торця втулки Ra=3,2 мкм	60	20	2,0
19	Виливок з кіркою. Бронза Бр АЖН 10-4, HB170	Обточування на прохід Ra=1,6 мкм	88	85e12	140
20	Прокат. Латунь ЛМцЖ 52-4-1, HB220	Розточування в упор Ra=3,2 мкм	48	53H11	65
21	Оброблена. Сірий чавун СЧ 30, HB220	Підрізання торця Ra=1,6 мкм	65	0	1,5
22	Оброблена. Сірий чавун СЧ 20, HB220	Обробка в упор Ra=3,2 мкм	74	80H11	220
23	Кування. Сталь 30ХН3А, $\sigma_b=800$ МПа	Обробка на прохід Ra=12,5 мкм	105	115H12	260
24	Прокат. Сталь 30ХМ, $\sigma_b=780$ МПа	Підрізання торця Ra=1,6 мкм	80	0	2,5
25	Оброблена. Сталь 45, $\sigma_b=650$ МПа	Обробка на прохід Ra=1,6 мкм	72	80H9	100
26	Прокат. Сталь ШХ15, $\sigma_b=700$ МПа	Розточування на прохід Ra=3,2 мкм	90	95H11	60
27	Кування. Ковкий чавун КЧ30, HB163	Обточування на прохід Ra=12,5 мкм	115	110h7	150
28	Виливок з кіркою. Сірий чавун СЧ 15, HB163	Обточування в упор Ra=6,3 мкм	150	142h8	70
29	Прокат. Бронза Бр АЖ 9-4, $\sigma_b=500$ МПа	Розточування в упор Ra=12,5 мкм	60	69H11	50
30	Прокат. Сталь 35Г2, $\sigma_b=618$ МПа	Підрізання торця втулки Ra=6,3 мкм	100	80	3,0

2. Практична робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПРИ СВЕРДЛІННІ

Мета роботи: опанувати методику визначення оптимальних режимів різання при свердлінні, що забезпечують найбільш економічну обробку заготовок при заданих технічних обмеженнях.

Свердління призначено для одержання в суцільному металі глухих та наскрізних отворів, що відповідають 14 – 11 квалітетам точності, шорсткості $Ra\ 50 \dots Ra\ 12,5$ і відрізняються:

- змінною швидкістю різання по довжині різальної кромки від 0 до V_{max} ;
- змінними переднім і заднім кутами по довжині різального леза;
- наявністю поперечної кромки, що утруднює процес різання;
- утрудненням видаленням стружки;
- низькою жорсткістю інструменту.

При свердлінні деталей із сталей та важкооброблюваних сплавів застосовуються як стандартні, так і спеціальні свердла підвищеної жорсткості, що зроблені із швидкорізальних сталей (Р6М5, Р6М5К5, Р9М4К8) чи твердих сплавів (ВК8, ВК10М). Наприклад, при обробці заготовок із сплавів на титановій основі має сенс застосовувати чотиристрічкові спіральні свердла, що мають підвищену стійкість та обмежують збільшення діаметра отвору порівняно із звичайними двострічковими свердлами.

У процесі свердління конструкційних матеріалів інструмент знаходиться під дією значних осьових стискних сил P_o і крутного моменту $M_{кр}$. Ці фактори лімітують вибрані режими різання і є основними при розгляді комплексу обмежень у завданні оптимізації.

Формування системи обмежень

1. Обмеження відносно різальних можливостей (швидкості різання) інструменту

Це обмеження відтворює взаємний зв'язок між швидкістю різання V та показником оброблюваності V_T (швидкість різання, що відповідає стійкості інструменту), тобто

$$V \leq V_T;$$

$$V = \pi \cdot D \cdot n / 1000;$$

$$V_T = \frac{C_v \cdot D^q \cdot k_v}{T^m \cdot S^y}.$$

Використовуючи ці залежності, зводимо обмеження до явного вигляду

$$n \cdot S^y \leq \frac{318 \cdot D^{(q-1)} C_v \cdot k_v}{T^m}. \quad (2.1)$$

2. Обмеження відносно потужності верстата

Обмеження зв'язує крутний момент, що потрібен при свердлінні M_{KP} , і крутний момент, що виникає на шпинделі верстата $M_{KP.B}$, тобто

$$M_{KP} \leq M_{KP.B},$$

$$M_{KP} = 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot S^y \cdot k_p, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

$$M_{KP.B} = \frac{9750 \cdot N_B \cdot \eta}{n}, \text{ Н}\cdot\text{м},$$

де N_B – потужність електродвигуна приводу головного руху, кВт; n – число обертів, об/хв.

Порівнюючи праві частини останніх двох залежностей і зробивши відповідні перетворення, одержимо

$$n \cdot S^y = \frac{975 \cdot N_B \cdot \eta}{C_M \cdot D^q \cdot k_p}. \quad (2.2)$$

Отже, розраховане обмеження M_{KP} характеризує вибрану потужність верстата.

3. Обмеження відносно міцності механізму подачі верстата

Для здійснення процесу різання потрібно, щоб виконувалася умова

$$P_o = 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot S^y \cdot k_p \leq [P_B],$$

де P_o , $[P_B]$ – відповідно осьова і максимальна сили різання, що допускаються механізмом подач верстата.

В явному вигляді це обмеження записується так:

$$S^y \leq \frac{[P_B]}{10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot k_p} . \quad (2.3)$$

4. Обмеження відносно міцності інструменту

Умова міцності свердла визначається за формулою

$$\tau_c = \frac{1,73 \cdot M_{KP}}{W} \quad \text{або} \quad \tau_c = \frac{1,73 \cdot 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot S^y \cdot k_p}{0,02 \cdot D^3} \leq \frac{\sigma_B}{k_3},$$

де τ_c – сумарне напруження, що дорівнює сумі нормального напруження (складає $0,73\tau_c$) від сили P_o та дотичного напруження від M_{KP} , МПа; σ_B – тимчасовий опір матеріалу свердла розриву, МПа; k_3 – коефіцієнт запасу міцності, $k_3 = 1,5 \div 2$; W – момент опору свердла, мм^3 , $W = 0,02 \cdot D^3$.

Після відповідних перетворень одержуємо:

$$S^y \leq \frac{0,02 \cdot D^3 \cdot \sigma_B}{1,73 \cdot 10 \cdot C_M \cdot D^q \cdot k_p \cdot k_3} . \quad (2.4)$$

Наведене обмеження гарантує цілісність свердла в умовах напружень, що виникають у його матеріалі.

5. Обмеження відносно жорсткості інструменту

Жорсткість інструменту впливає на точність обробки, при цьому осьова сила P_o не повинна перевищувати допустиму (критичну) осьову силу $[P_o]_{кр}$

$$P_o \leq [P_o]_{кр} \quad \text{або} \quad 10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot S^y \cdot k_p \leq \frac{k_y \cdot E \cdot I}{L^2} ,$$

де k_y – коефіцієнт втоми, $k_y = 2,46$; E – модуль пружності матеріалу свердла, МПа; I – момент інерції свердла, мм^4 , $I = 0,039 \cdot D^4$; L – довжина вільоту свердла.

В явному вигляді це обмеження записується так:

$$S^y \leq \frac{k_y \cdot E \cdot I}{10 \cdot C_p \cdot D^q \cdot k_p \cdot L^2} . \quad (2.5)$$

Виконання обмеження гарантує цілісність свердла в умовах можливої втрати поздовжньої утоми.

6. Обмеження, що визначаються кінематикою верстата

Дані обмеження враховують взаємний зв'язок розрахункових значень частоти обертання та подачі з тими значеннями, що допускаються кінематикою верстата. Ці умови можуть бути записані у вигляді таких нерівностей:

$$n_{B.min} \leq n \leq n_{B.max} ; \quad S_{B.min} \leq S \leq S_{B.max} . \quad (2.6)$$

Вибір цільової функції

Для більшості виробничих ситуацій, коли в розрахунках використовуються значення економічних періодів стійкості інструменту, як цільову функцію слід вибрати найменший основний час t_0 :

$$t_0 = L/n \cdot S_0.$$

Розробка математичної моделі процесу різання при свердлінні

Математичною моделлю в завданні оптимізації режимів різання при свердлінні є сумісна система одержаних нерівностей і рівняння цільової функції. Залежно від застосованого методу вихідна модель підлягає відповідним перетворенням, щоб бути зорієнтованою на найбільш поширений метод лінійного програмування. Перетворення вихідної моделі здійснюється логарифмуванням виразів обмежень і цільової функції та одержанням відповідних лінійних форм.

Введемо позначення $\ln n = x_1$; $\ln S_0 = x_2$.

Перетворивши таким чином нерівності обмежень, одержимо систему A лінійних нерівностей та лінійну функцію.

Наведена форма математичної моделі A являє собою опис процесу різання при свердлінні, незалежно від типу верстата та умов обробки.

Для визначення оптимальних режимів за допомогою моделі потрібно знайти позитивні значення x_1 та x_2 , для яких лінійна форма цільової функції була б максимальною.

$$\left. \begin{array}{rcl} x_1 + ux_2 & \leq & b_1 \\ x_1 + ux_2 & \leq & b_2 \\ ux_2 & \leq & b_3 \\ ux_2 & \leq & b_4 \\ ux_2 & \leq & b_5 \\ x_1 & \leq & b_6 \\ x_1 & \geq & b_7 \\ x_2 & \leq & b_8 \\ x_2 & \geq & b_9 \end{array} \right\} A,$$

$$f_o = (x_1 + x_2) \rightarrow \max$$

Графічна інтерпретація та визначення оптимальних режимів різання

Для визначення n та S графічним шляхом потрібно побудувати багатокутник можливих розв'язків системи обмежень, що входять в A . На рис. 4 зображені прямі нерівності системи A і виділена область можливих розв'язків АВСД цієї системи. Граничні прямі АВ, ВС, СД і ДА, перетинаючись між собою, створюють багатокутник, всередині якого кожна із точок задовольняє нерівності всіх граничних прямих системи A , що беруть участь у його створенні.

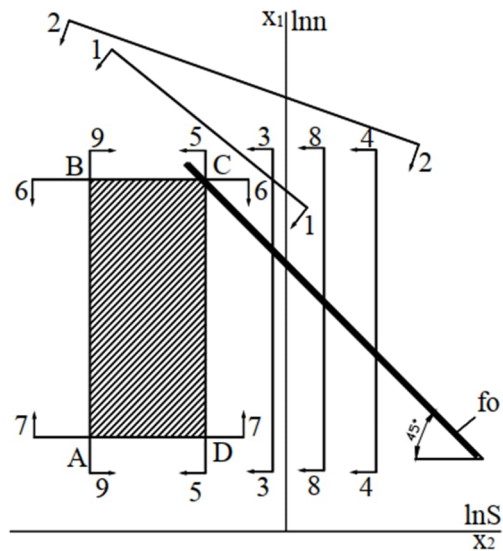


Рисунок 4 – Графічне рішення задачі

Для визначення оптимального поєднування елементів n та S слід встановити, в якій із точок побудованого багатокутника ABCD лінійна функція двох змінних $f_o = x_1 + x_2$ буде набувати максимального значення. Для цього потрібно переміщати пряму f_o паралельно самій собі в напрямку від початку координат. У вершині C багатокутника цільова функція f_o набуде найбільшого значення. Отже, вершина C є точкою оптимуму, а її координати n та S – оптимальним розв'язком моделі A.

Завдання № 2.

Визначити оптимальні режими обробки при свердлінні.

На вертикально-свердильному верстаті 2Н125 обробити наскрізний отвір діаметром 25Н7 ($Ra=1,6$ мкм), $l=125$ мм. Матеріал заготовки СЧ18, НВ210.

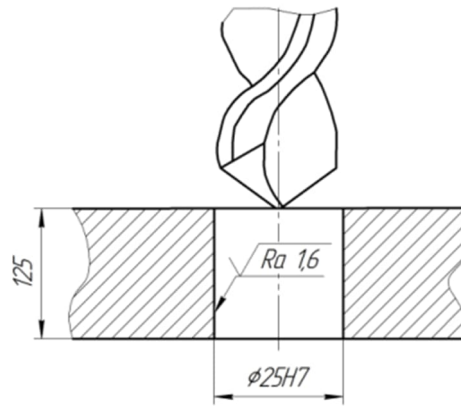


Рисунок 5 – Схема обробки

Паспортні данні верстатів та варіанти завдань приведені в таблицях 5 та 6.

Таблиця 5 – Паспортні дані свердлильних верстатів

Модель верстата / (D _{max})	Потуж- ність приво ду N, кВт	ККД приво ду η	Допусти ме тягове зусилля, Н	n _{верстата} , об/хв		S _{0верст} , мм/об	
				min	max	min	Max
Вертикально-свердлильні							
2Н118 / (18мм)	1,5	0,8	5600	180	2800	0,1	0,56
2Н125 / (25мм)	2,8	0,8	9000	45	2000	0,1	1,6
2Н135 / (35мм)	4,5	0,8	15000	31,5	1400	0,1	1,6
2Н150 / (50мм)	7,5	0,8	25000	22,5	1000	0,05	2,24
Радіально-свердлильні							
2К52 / (25мм)	1,5	0,8	4000	63	1600	0,1	0,2
2М55 /(50мм)	4,0	0,8	20000	20	2000	0,056	2,5

Таблиця 6 – Варіанти завдань до практичної роботи № 2

№	Матеріал заготовки і його характеристики	Діаметр отвору D мм, параметр шорсткості, мкм	Довжина отвору l, мм
1	2	3	4
1	Сталь 12ХН2, σ _в =800 МПа	18Н7, Ra=1,6	15
2	Сталь 12ХН3А, σ _в =950 МПа	25Н5, Ra=0,4	20
3	Сірий чавун СЧ30, HB200	30Н5, Ra=0,4	22
4	Сірий чавун СЧ20, HB210	35Н7, Ra=1,6	18
5	Сталь 38ХА, σ _в =680 МПа	28Н7, Ra=1,6	15
6	Сталь 35, σ _в =560 МПа	38Н8, Ra=6,3	17
7	Сірий чавун СЧ15, HB170	45Н9, Ra=3,2	14
8	Сірий чавун СЧ10, HB160	17Н7, Ra=1,6	5
9	Сталь 40ХН, σ _в =700 МПа	45Н9, Ra=6,3	10
10	Сталь Ст3, σ _в =600 МПа	50Н9, Ra=6,3	6
11	Сталь 40Х, σ _в =750 МПа	22Н5, Ra=0,4	12
12	Сталь Ст5, σ _в =600 МПа	16Н5, Ra=0,4	13
13	Сірий чавун СЧ20, HB180	38Н9, Ra=6,3	8
14	Сірий чавун СЧ20, HB200	50Н9, Ra=3,2	20
15	Сталь 20Х, σ _в =580 МПа	20Н5, Ra=0,4	14
16	Сталь 50, σ _в =750 МПа	30Н7, Ra=1,6	16
17	Бронза Бр АЖН 10-4, HB170	28Н7, Ra=1,6	15
18	Латунь ЛМцЖ 52-4-1, HB220	40Н9, Ra=3,2	8
19	Сірий чавун СЧ30, HB220	23Н5, Ra=0,4	14
20	Сірий чавун СЧ20, HB220	32Н7, Ra=1,6	13
21	Сталь 30ХН3А, σ _в =800 МПа	20Н7, Ra=1,6	16
22	Сталь 30ХМ, σ _в =780 МПа	55Н8, Ra=3,2	11
23	Сталь 45, σ _в =650 МПа	48Н9, Ra=6,3	15
24	Сталь 20, σ _в =500 МПа	50Н8, Ra=3,2	20
25	Силумін АЛ4, HB50	35Н7, Ra=1,6	22
26	Чавун КЧ35, HB163	42Н9, Ra=6,3	18
27	Сталь 38ХС, σ _в =950 МПа	22Н5, Ra=0,4	15
28	Сталь 50, σ _в =900 МПа	37Н9, Ra=6,3	17
29	Чавун КЧ20, HB280	32Н7, Ra=1,6	14
30	Чавун ВЧ60, HB250	27Н5, Ra=0,4	5

3. Практична робота № 3

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ПРИ ФРЕЗЕРУВАННІ

Мета роботи: опанувати методику визначення оптимальних режимів різання при фрезеруванні, що забезпечують найбільш економічну обробку заготовок при заданих технічних обмеженнях.

Необхідно врахувати, що для всіх видів фрезерування, в тому числі і для торцевого, глибина різання t (рис. 6) визначає тривалість контакту зуба фрези з заготовкою і вимірюється в напрямку, перпендикулярному до осі фрези, а ширина фрезерування B визначає довжину леза зуба фрези, що бере участь у різанні, і вимірюється в напрямку осі фрези.

Тому, щоб правильно використовувати довідкові дані, необхідно у всіх розрахункових формулах поміняти місцями показники ступеня за глибини різання t і ширини фрезерування B .

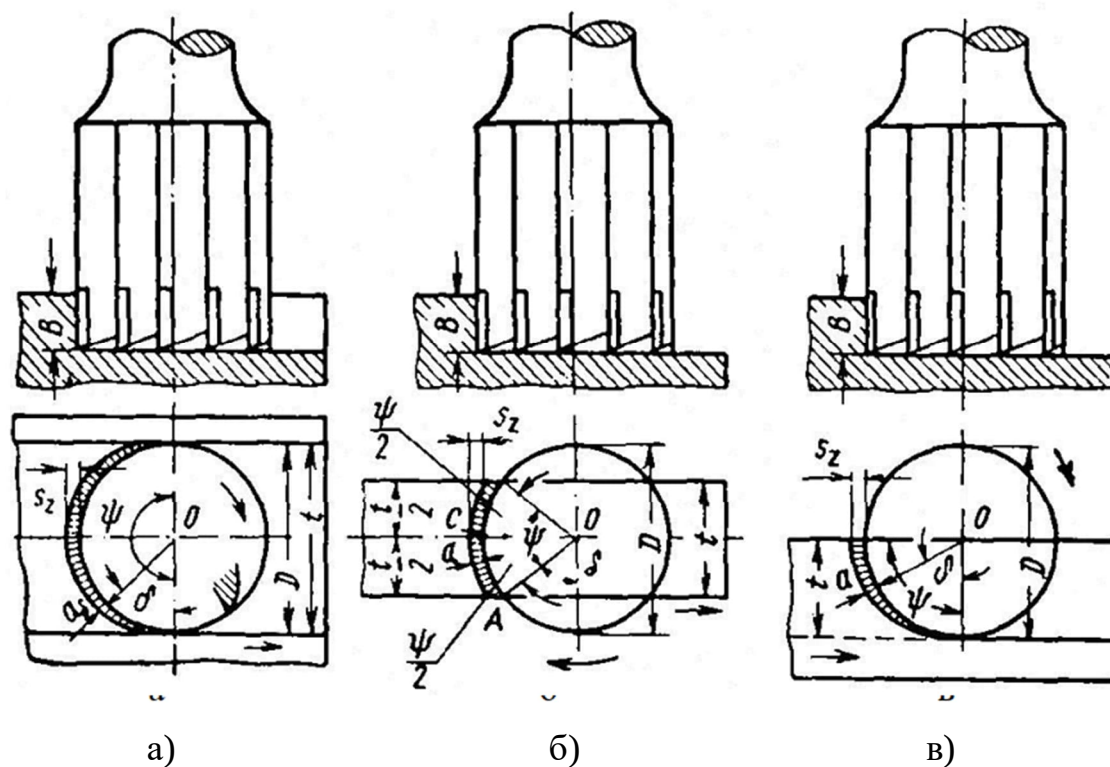


Рисунок 6 – Схеми торцевого фрезерування:

а – симетричного повного; б – симетричного неповного;

в – несиметричного.

Вибір тих чи інших технічних обмежень залежить від виду обробки та визначається конкретними умовами технологічного, конструкційного та виробничого характеру. Розглянуто завдання двопараметричної оптимізації режимів різання (швидкості різання та подачі) на останньому проході, тому ширина фрезерування має бути відомим і обраним заздалегідь. Обробку плоских поверхонь торцевими фрезами проводять за один-чотири переходи в залежності від способу отримання заготовки, її точності та необхідної точності деталі. У таблиці 7 наведено рекомендації щодо вибору мінімальної ширини фрезерування кожному з переходів.

Таблиця 7 – Мінімальна ширина фрезерування

Розмір поверхні, мм	Вид обробки	Квалітет розмірів		Мінімальна ширина фрезерування B при виконуваному розмірі, не більше, мм						
		заготовки	деталі	80	120	180	250	315	400	500
До 160×160	Напівчистова	14	13-12	2,10	2,30	2,60	2,80	3,10	3,30	3,50
		13	12	1,25	1,45	1,70	1,85	2,05	2,20	2,30
	Чистова	13-12	11-10	1,10	1,20	1,30	1,40	1,55	1,65	1,75
		11	10	0,65	0,65	0,70	0,75	0,85	0,95	1,05
	Оздоблювальна	11-10	9-7	0,45	0,50	0,55	0,63	0,70	0,80	0,85
До 400×400	Напівчистова	14	13-12	2,15	2,35	2,65	2,85	3,15	3,35	3,55
		13	12	1,35	1,55	1,80	1,95	2,15	2,30	2,40
	Чистова	13-12	11-10	1,15	1,25	1,40	1,50	1,65	1,75	1,85
		11	10	0,65	0,70	0,75	0,80	0,90	1,0	1,05
	Оздоблювальна	11-10	9-7	0,50	0,55	0,55	0,65	0,70	0,75	0,80
Понад 400×400	Напівчистова	14	13-12	2,30	2,50	2,80	3,00	3,30	3,50	3,70
		13	12	1,45	1,65	1,90	2,05	2,25	2,40	2,50
	Чистова	13-12	11-10	1,25	1,35	1,50	1,60	1,75	1,85	1,95
		11	10	0,70	0,75	0,80	0,85	0,95	1,05	1,10
	Оздоблювальна	11-10	9-7	0,55	0,55	0,60	0,70	0,75	0,80	0,85

Рекомендується наступний порядок вибору ширини фрезерування:

– визначається припуск на обробку h як різниця між розміром заготівлі $Hз$ та деталі $Hд$: $h = Hз - Hд$;

- за таблицею визначається табличне значення ширини фрезерування $B_{\text{табл}}$;
- розраховується число проходів $i = h/B_{\text{табл}}$ із округленням до цілого;
- визначається потрібна ширина фрезерування $B = h/i$, використовувана у розрахунку.

Формування системи обмежень

1. Обмеження за потужності приводу головного руху верстата.

Це обмеження встановлює зв'язок між ефективною потужністю різання та потужністю приводу головного руху верстата. Воно виражається умовою

$$N_e \leq N \cdot \eta, \quad (3.1)$$

де N – потужність приводу головного руху верстата; η - коефіцієнт корисної дії кінематичного ланцюга від електродвигуна до інструменту.

Ефективна потужність різання, кВт, що витрачається на процес різання, розраховується за формулою

$$N_e = \frac{P_z \cdot V}{1020 \cdot 60}, \quad (3.2)$$

де P_z – окружна сила різання, Н; V – швидкість різання, м/хв.

Окружна сила різання P_z при торцевому фрезеруванні (рис. 7) визначається за формулою

$$P_z = \frac{10 \cdot C_{PZ} \cdot t^n \cdot S_z \cdot B^x \cdot z_p \cdot k_{MP}}{D^q \cdot n^w}, \quad (3.3)$$

де t - глибина різання, мм; S_z - подача на зуб фрези, мм/зуб; B – ширина фрезерування, мм; z_p - число різальних зубів фрези; D – діаметр фрези за стандартом, мм.

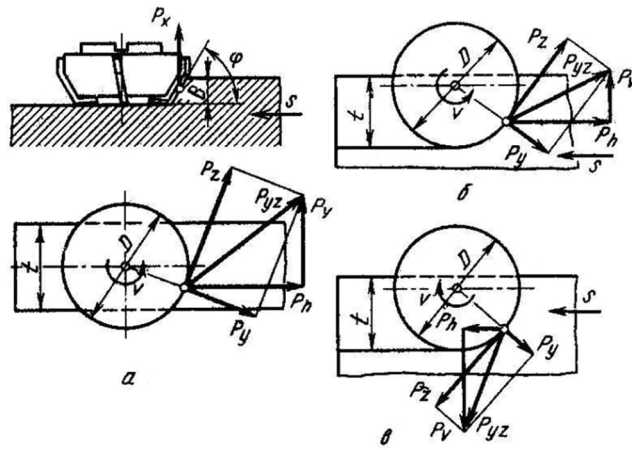


Рисунок 7 – Складові сили різання при торцевому фрезеруванні:
а – симетричному зустрічному; б – несиметричному зустрічному;
в – несиметричному попутному

Число різальних зубів при симетричному торцевому фрезерування визначається кутом контакту Ψ (див. рис. 6) та кутовим кроком фрези $\theta = 360^\circ/z$, де z – число зубів фрези за стандартом.

$$z_p = \frac{2 \cdot \arcsin\left(\frac{t}{D}\right) \cdot z}{360^\circ} . \quad (3.4)$$

Підставив в вираз (3.2) значення сили P_z з урахуванням співвідношення між швидкістю різання V та частотою обертів шпинделя n

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} , \quad (3.5)$$

отримаємо шукане обмеження у вигляді

$$n^{1-w} \cdot S_z^y \leq \frac{1020 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot N_g \cdot \eta}{10 \cdot C_{PZ} \cdot t^n \cdot B^x \cdot D^{1-q} \cdot \pi \cdot z_p \cdot k_{MP}} . \quad (3.6)$$

2. Обмеження за міцністю механізму подачі верстата.

Воно встановлює взаємозв'язок розрахункових швидкості різання та подачі з допустимими значеннями міцності механізму подач верстата.

Виходячи із схеми дії сил при торцевому фрезеруванні (див. рис. 7), уздовж осі ходового гвинта приводу поздовжніх подач столу спрямована сила Ph . Сумарна сила опору переміщенню столу Ph повинна бути меншою або

дорівнювати навантаженню $[Ps]$, що допускається міцністю механізму подачі верстата

$$Ph \leq [Ps] . \quad (3.7)$$

Сила подачі Ph при фрезеруванні визначається залежно від окружної сили Pz як $Ph / Pz = k$, де значення коефіцієнта k наведено в таблицях довідників.

Тоді можна записати

$$k \cdot Pz \leq [Ps]. \quad (3.8)$$

Підставив в нерівність (3.8) вираз для Pz із (3.3) і вирішуючи його відносно S та n , отримаємо шукане обмеження у вигляді

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{[P_s] \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^n \cdot B^x \cdot z_p \cdot k_{mp} \cdot k} . \quad (3.9)$$

3. Обмеження за мінімальною частотою обертання шпинделя.

Швидкість різання не може бути обрана менше, ніж можлива при найменшій частоті обертання шпинделя верстата $n_{\text{в.}min}$ за паспортними даними

$$n \geq n_{\text{в.}min} \quad (3.10)$$

4. Обмеження за максимальною частотою обертання шпинделя.

Швидкість різання не може бути обрана більше, ніж можлива за максимальною частотою обертання шпинделя верстата $n_{\text{в.}max}$ за паспортними даними

$$n \leq n_{\text{в.}max} \quad (3.11)$$

5. Обмеження за мінімальною подачею.

Розрахункова величина хвилинної подачі не може бути обрана менше, ніж мінімальна за паспортними даними верстата $S_{\text{хв.}min}$

$$n \cdot z \cdot Sz \geq S_{\text{хв.}min} ; n \cdot Sz \geq S_{\text{хв.}min} / z . \quad (3.12)$$

6. Обмеження за максимальною подачею.

Розрахункова величина хвилинної подачі не може бути вибрано більше, ніж максимальна за паспортними даними верстата $S_{xв.мах}$

$$n \cdot z \cdot Sz \leq S_{xв.мах} ; n \cdot Sz \leq S_{xв.мах} / z. \quad (3.13)$$

7. Обмеження за стійкості інструменту.

Різальні можливості інструменту, що визначаються періодом його стійкості, відображені у формулі швидкості різання (м/хв)

$$V = \frac{C_v \cdot D^q \cdot k_v}{T^m \cdot t^u \cdot S_z^y \cdot B^x \cdot z^p}, \quad (3.14)$$

де T - період стійкості інструменту, хв; m – показник відносної стійкості інструменту; C_v, x, y, u, p - коефіцієнти, що характеризують умови обробки; k_v - загальний поправний коефіцієнт, що приводить табличні значення коефіцієнтів до реальним умовам обробки з урахуванням фізико-механічних властивостей матеріалу заготівлі, стану її поверхні та матеріалу різальної частини інструмента.

Прирівняв рівняння (3.5) та (3.14), вирішуючи їх відносно S та n , отримаємо шукане обмеження у вигляді:

$$n \cdot S_z^y \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot k_v}{T^m \cdot t^u \cdot \pi \cdot B^x \cdot z^p}. \quad (3.15)$$

8. Обмеження за міцності зуба інструменту.

Режими різання обмежені міцністю матеріалу зуба фрези

$$\sigma_u \leq [\sigma]_u, \quad (3.16)$$

де σ_u – діючі напруги вигину в небезпечному перерізі зуба; $[\sigma]_u$ – межа міцності матеріалу зуба при згинанні, МПа.

З достатньою для практики точністю міцність зуба може бути визначена за згинальним моментом від сили різання Pz з введенням коефіцієнта k_z , що враховує складне навантаження. Розглядаючи у першому наближенні зуб фрези як балку, навантажену на кінці зосередженою силою Pz , запишемо відоме співвідношення з теорії вигину для визначення напруг

$$\sigma_u = \frac{M_u \cdot k_3}{W}, \quad (3.17)$$

де M_u - згинальний момент у місці закріплення зуба від дії окружної сили P_z (Н·мм); k_3 - коефіцієнт запасу, що враховує складне навантаження, $k_3 = 1,3 \div 1,5$; W - момент опору перерізу зуба, мм³.

Згинальний момент у небезпечному перерізі зуба

$$M = P_z \cdot L_{в.з.}, \quad (3.18)$$

де $L_{в.з.}$ - виліт зуба фрези з корпусу, мм.

Момент опору прямокутного перерізу зуба

$$W = B \cdot H^2 / 6, \quad (3.19)$$

де B - ширина зуба, мм; H - висота зуба, мм.

Підставляючи вирази (3.3), (3.17), (3.18) у нерівність (3.16) і вирішуючи його щодо n та S_z , отримаємо шукане обмеження:

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{D^q \cdot [\sigma]_u \cdot W}{10 \cdot C_{PZ} \cdot t^n \cdot B^x \cdot z_P \cdot k_{MP} \cdot k_3 \cdot L_{в.з.}}. \quad (3.20)$$

9. Обмеження за жорсткості інструменту.

Жорсткість різального інструменту обмежує режим різання з умови забезпечення заданої точності обробки та обмеження рівня вібрацій системи. Тут розглядається лише перша умова. При фрезеруванні торцевою фрезою зазначене обмеження не лімітує режими різання і тому може розглядатися.

При фрезеруванні кінцевою фрезою радіальна складова зусилля різання P_Y (див. рис. 7) не повинна перевищувати максимальне навантаження $P_{ж}$, що допускається жорсткістю фрези

$$P_Y < P_{ж}. \quad (3.21)$$

Максимальне навантаження, що допускається жорсткістю фрези, визначається виразом

$$P_{ж} = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot f}{L_{вф}^3}, \quad (3.22)$$

де f - допустима величина віджиму кінцевої фрези, що приймається в відповідно до заданого квалітету точності обробки; E - модуль пружності матеріалу державки фрези, для державок з вуглецевої конструкційної сталі $E = 2,1 \cdot 10^5$ (Н/мм²); I - момент інерції перерізу державки; для державки круглого перерізу

$$I = \pi \cdot D^4 / 64 . \quad (3.23)$$

Підставивши в нерівність (3.21) вирази (3.3), (3.22), (3.23), а також значення k для відношення P_y/P_z і вирішивши його щодо n та S_z , отримаємо шукане обмеження

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot f \cdot D^q}{10 \cdot C_{PZ} \cdot t^n \cdot B^x \cdot z_P \cdot k_{MP} \cdot k_3 \cdot L_{\text{эф}}^3} . \quad (3.24)$$

10. Обмеження за точності обробки.

Це обмеження встановлює зв'язок розрахункових значень швидкості різання та подачі з точністю обробки, яка залежить від жорсткості технологічної системи верстат - пристрій - інструмент - заготівля.

Умова забезпечення точності обробки має вигляд

$$Y_x \leq T_H , \quad (3.25)$$

де Y_x – пружні переміщення фрези у напрямі вертикальної складової сили P_x , обумовлені коливаннями припуску, твердість по довжині обробки (див. рис. 7); T_H – величина допуску оброблюваного розміру за квалітетом точності.

$$Y_x = P_x / j = P_x \cdot \omega , \quad (3.26)$$

де ω - податливість технологічної системи.

З урахуванням співвідношення між силами P_x та P_z у вигляді $k = P_x / P_z$ нерівність (3.25) запишеться у вигляді

$$k \cdot P_z \cdot \omega \leq T_H . \quad (3.27)$$

Підставивши в рівняння (3.27) значення сили P_z (3.3) і вирішивши його щодо шуканих параметрів режиму обробки, після перетворень отримаємо

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_{PZ} \cdot t^n \cdot B^x \cdot z_P \cdot k_{MP} \cdot k \cdot \omega} . \quad (3.28)$$

11. Обмеження за шорсткості обробленої поверхні.

Встановимо зв'язок розрахункової величини подачі S_z з подачею, допускається вимогами до шорсткості обробленої поверхні. При напівчистовій та чистовій обробці повинна дотримуватися умова

$$S_z \leq S_{zmax}, \quad (3.29)$$

де S_{zmax} - максимально допустима подача, що забезпечує отримання заданої шорсткості.

На рис. 8 зображено розрахунковий мікропрофіль обробленої поверхні при фрезеруванні торцевими (а) та циліндричними (б) фрезами. Розрахункова величина нерівностей R_{zp} визначається шляхом чисто геометричних побудов та складає:

- при обробці торцевою фрезою

$$R_{zp} = \frac{S_z \cdot \sin \varphi \cdot \sin \varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}, \quad (3.30)$$

- при обробці циліндричною фрезою

$$R_{zp} = 0,5 \cdot (D - \sqrt{D^2 - S_z^2}), \quad (3.31)$$

де φ і φ_1 – головний і допоміжний кути в плані торцевих зубів фрези; D – діаметр циліндричної фрези.

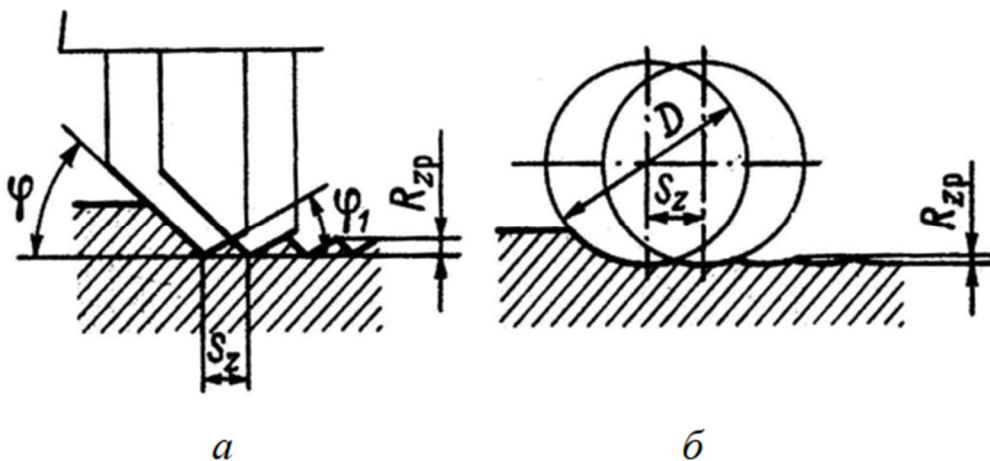


Рисунок 8 – Розрахунковий мікропрофіль обробленої поверхні при фрезеруванні торцевою (а) та циліндричною (б) фрезами

При чистовому фрезеруванні торцевою фрезою, коли в утворенні поверхні бере участь лише вершинна ріжуча кромка, виконана у вигляді

закруглення радіусом r , можна скористатися для визначення Rzp відомою формулою П.Л. Чебишева

$$Rzp = \frac{S_z^2}{8 \cdot r} . \quad (3.32)$$

Розрахункові нерівності зменшуються при зменшенні подачі на зуб, кутів у плані та збільшенні радіуса перехідної ріжучої кромки зубів фрези або діаметра циліндричної фрези. Якщо на зубах торцевої фрези зробити допоміжний кут у плані рівним нулю, а довжину допоміжної ріжучої кромки на 20÷30% більше подачі на оберт фрези S_o , то $Rzp = 0$.

Дійсні профілі мікронерівностей як у поперечному, так і в поздовжньому напрямках значно відрізняються за формою та розмірів від розрахункових. Ця різниця – результат пластичних деформацій оброблюваного матеріалу, вібрацій деталі та інструменту, тертя на контактних поверхнях інструменту та ін. Підвищення твердості та зменшення пластичності оброблюваного матеріалу призводять до зменшення дійсних значень нерівностей та наближення їх до розрахункових.

Глибина різання та передній кут надають незначний вплив на висоту нерівностей. Вплив швидкості різання на висоту нерівностей залежить від схильності оброблюваного матеріалу до наростоутворення. При збільшенні швидкості наріст зникає і висота нерівностей зменшується. При швидкостях різання, що перевищують 120÷150 м/хв, вплив швидкості на шорсткість практично припиняється, а висота дійсних нерівностей Rz наближається до розрахункового значення Rzp .

Підставляючи рівняння (3.32) або (3.30) у нерівність (3.29), отримаємо шукане обмеження

$$S_z \leq 2,82 \cdot r^{0,5} \cdot Rz^{0,5} , \quad (3.33)$$

або

$$S_z = \frac{R_z \cdot \sin(\varphi + \varphi_1)}{\sin \varphi \cdot \sin \varphi_1} . \quad (3.34)$$

Вибір цільової функції

Вибрані технічні обмеження разом із цільовою функцією дозволяють побудувати математичну модель процесу обробки. Як цільову функцію прийнято собівартість операції F , яка виражається через режими обробки у вигляді

$$F = C / (n \cdot S_0), \quad (3.35)$$

де коефіцієнт C залежить від умов обробки, але не залежить від режимів різання.

Розробка математичної моделі процесу різання при фрезеруванні

Математична модель оптимального режиму різання містить систему технічних обмежень, виражених у вигляді лінійних нерівностей, та лінійне рівняння цільової функції. Тому необхідно навести всі технічні обмеження та цільову функцію до лінійного вигляду шляхом логарифмування.

Наприклад, обмеження (3.15) за стійкістю інструмента матиме вигляд

$$\ln n + y \cdot \ln(100 \cdot S_z) \leq \ln(b \cdot 100^y), \quad (3.36)$$

де $b = \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{q-1} \cdot k_v}{\pi \cdot B^u \cdot T^m \cdot t^x \cdot z^p}.$

Зазначимо, що подача множиться на 100, щоб уникнути отримання негативних значень логарифмів.

Введемо позначення: $x_1 = \ln n$; $x_2 = \ln(100 \cdot S_z)$. Тоді вираз (3.36) прийме вигляд

$$x_1 + y \cdot x_2 = b_i \quad (3.37)$$

Рівняння цільової функції (3.35) перетворюється на вигляд

$$\ln F = \ln C - [\ln n + \ln(100 \cdot S_z)]$$

або

$$\ln F = \ln C - (x_1 + x_2). \quad (3.38)$$

Позначимо $\ln F = f$; $\ln C = A$, тоді вираз (3.38) набуде вигляду

$$f = A - (x_1 + x_2). \quad (3.39)$$

Очевидно, величина f дорівнюватиме максимуму або мінімуму, якщо дужка $(x_1 + x_2)$ відповідно прагнучиме до мінімуму або максимуму.

Тому цільову функцію f для нашого завдання мінімізації собівартості обробки подаємо у вигляді

$$f = (x_1 + x_2) \Rightarrow \max. \quad (3.40)$$

Виконав логарифмування залежностей інших технічних обмежень з урахуванням цільової функції (3.35), отримаємо математичну модель завдання визначення оптимальних режимів різання при фрезеруванні

$$(n_{pz} + 1) \cdot x_1 + y_{pz} \cdot x_2 \leq b_1$$

.....

$$x_1 \geq b_3$$

$$n_{py} \cdot x_1 + y_{py} \cdot x_2 \leq b_{10} \quad (3.41)$$

$$z \cdot x_1 + y \cdot x_2 \leq b_{11}$$

$$f = (x_1 + x_2) \Rightarrow \max$$

Зазначена математична модель (3.41) не є вичерпною та може бути доповнена у міру виявлення додаткових даних про фізичних, кінематичних та економічних закономірностей, що супроводжують процес обробки (за допустимою температурою в зоні різання, за параметрами якості поверхні та ін.).

Графічне рішення завдання

Визначення оптимальних режимів обробки за моделлю (3.41) може бути виконано графічно (рис. 9). У цьому випадку кожне технічне обмеження представляється граничною прямою, яка визначає напівплощину, де можливе існування рішень системи нерівностей. Граничні прямі, перетинаючись, утворюють багатокутник рішень, всередині якого координати будь-якої точки задовольняють усім без винятку обмежень.

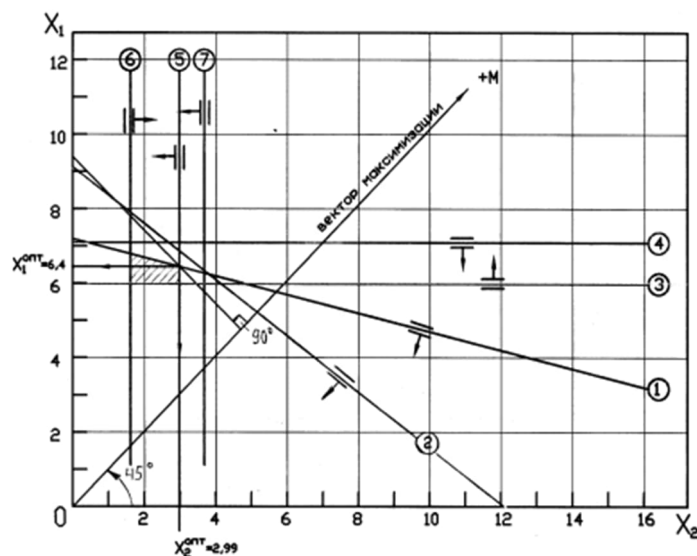


Рисунок 9 – Графічне розв'язання задачі

Тому завдання пошуку оптимальних значень x_1 і x_2 зводиться до теорії лінійного програмування. Показано, що екстремальне значення цільової функції при опуклому багатокутнику рішень забезпечується для x_1 і x_2 , відповідних точці, що лежить на одній з граничних прямих, або точки їх перетину. Завдання зводиться до послідовного обчислення координат усіх можливих точок перетину граничних прямих та визначення для них найбільшої суми $f = x_1 + x_2 = \max$.

Після визначення координат x_1 та x_2 , що забезпечують виконання умови (3.40), обчислюються оптимальні значення елементів режиму різання

$$n = e^{x_1}, \text{ об/хв} \quad (3.42)$$

$$S_z = e^{x_2} / 100, \text{ мм/зуб} \quad (3.43)$$

Завдання № 3.

Визначити оптимальні режими обробки при фрезеруванні.

Ескіз обробки приведено на рисунку 10, паспортні данні верстатів та варіанти завдань – в таблицях 8 та 9.

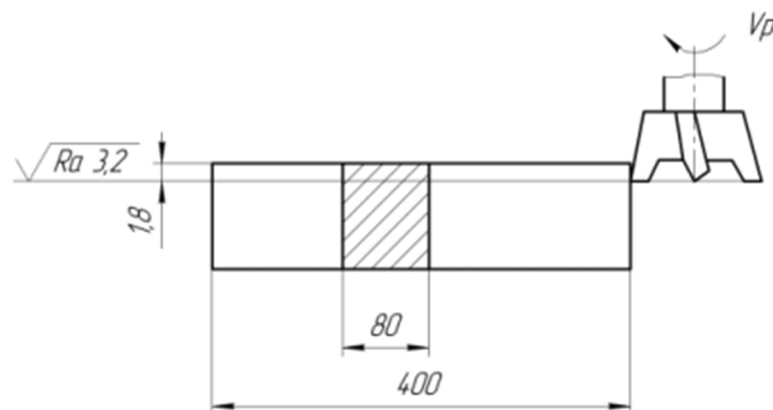


Рисунок 10 – Ескіз обробки при фрезеруванні

Таблиця 8 – Паспортні дані верстатів

Модель верстата	Розмір столу, мм	Потужність приводу N, кВт	$\omega = y_x/P_x$ мм / Н	Допустиме тягове зусилля, Н	n _{шп} , об/хв		S _{хв. прод.} мм/хв	
					min	max	min	max
6T104	160x630	2,2	0,25/3000	6000	63	2800	11,2	500
6T10	200x800	3	0,32/4900	8000	50	2240	20	1000
6T11	250x1000	5,5	0,4/7840	11000	50	1600	35	1020
6T12	320x1250	7,5	0,5/12250	15000	16	1600	12,5	1250
6T13	400x1600	11	0,63/19600	20000	16	1600	12,5	1250
Клас точності верстатів “Н” ; ККД приводу головного руху $\eta = 0,8$.								

Таблиця 9 – Варіанти завдань до практичної роботи № 3

№	Вид заготовки і її характеристика	B, мм	l, мм	h, мм	Вид обробки й параметр шорсткості, мкм
1	Сірий чавун СЧ30, HB200	100	600	5	Торцеве фрезерування, Ra=12,5
2	Сірий чавун СЧ20, HB210	150	500	4	Торцеве фрезерування, Ra=1,6
3	Сталь 38ХА, $\sigma_B=680$ МПа	80	400	6	Торцеве фрезерування, Ra=12,5
4	Сталь 35, $\sigma_B=360$ МПа	90	480	3,5	Торцеве фрезерування, Ra=1,6
5	Сірий чавун СЧ15, HB170	50	300	3,5	Циліндричне фрезерування, Ra=3,2
6	Сірий чавун СЧ10, HB160	80	250	1,5	Циліндричне фрезерування, Ra=3,2
7	Сталь 40ХН, $\sigma_B=700$ МПа	70	320	4	Циліндричне фрезерування, Ra=12,5
8	Сталь Ст3, $\sigma_B=600$ МПа	85	600	1,5	Циліндричне фрезерування, Ra=3,2
9	Сталь 40Х, $\sigma_B=750$ МПа	10	100	5	Фрезерувати паз, Ra=6,3
10	Сталь Ст5, $\sigma_B=600$ МПа	12	80	8	Фрезерувати паз, Ra=6,3
11	Сірий чавун СЧ20, HB180	20	120	10	Фрезерувати паз, Ra=6,3
12	Сірий чавун СЧ20, HB200	15	75	8	Фрезерувати паз, Ra=6,3
13	Сталь 20Х, $\sigma_B=580$ МПа	8	110	8	Фрезерувати паз, Ra=6,3
14	Сталь 50, $\sigma_B=750$ МПа	12	120	6	Фрезерувати паз, Ra=6,3
15	Бронза Бр АЖН 10-4 HB170	100	300	4	Торцеве фрезерування, Ra=12,5
16	Латунь ЛМцЖ 52-4-1, HB220	60	180	1,5	Торцеве фрезерування, Ra=12,5
17	Сірий чавун СЧ30, HB220	180	200	4,5	Торцеве фрезерування, Ra=12,5
18	Сірий чавун СЧ20, HB220	110	280	2,5	Торцеве фрезерування, Ra=12,5
19	Сталь 30ХН3А, $\sigma_B=800$ МПа	80	320	5	Циліндричне фрезерування, Ra=12,5
20	Сталь 30ХН, $\sigma_B=780$ МПа	115	300	3	Циліндричне фрезерування, Ra=3,2
21	Сталь 45, $\sigma_B=650$ МПа	40	280	1,8	Циліндричне фрезерування, Ra=1,6
22	Сталь 20, $\sigma_B=500$ МПа	35	400	3,5	Циліндричне фрезерування, Ra=6,3
23	Силумін АЛ-4, HB50	55	250	4	Торцеве фрезерування, Ra=6,3
24	Сталь 30ХМ, $\sigma_B=950$ МПа	70	310	4,5	Торцеве фрезерування, Ra=12,5
25	Сталь 18ХГТ, $\sigma_B=700$ МПа	85	350	2,5	Торцеве фрезерування, Ra=3,2
26	Чавун ВЧ50, HB250	120	300	5	Торцеве фрезерування, Ra=12,5

КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Практичні роботи приймаються на основі перевірки правильності отриманих розрахунково-аналітичних даних і графіків згідно завдання. За кожну роботу здобувач отримує до 20 балів (разом 60 балів).

Критерії оцінювання практичної роботи

За кожну практичну роботу здобувач вищої освіти може отримати таку кількість балів:

20 балів: виявлено підвищений рівень засвоєння обсягу знань і набуття вмінь; якісно, ретельно, самостійно та в повному обсязі виконано завдання. Матеріал викладено в логічній послідовності, а власні розрахунки та висновки здобувача відповідають темі практичного завдання.

15 балів: показано оволодіння достатнім обсягом знань і вмінь під час виконання завдання; продемонстровано самостійність в отриманні розрахунково-аналітичних даних, але з незначними неточностями; власні висновки здобувача відповідають темі практичного завдання.

10 балів: недостатньо показано оволодіння обсягом знань і вмінь під час виконання завдання; продемонстровано несамостійність в отриманні розрахунково-аналітичних даних, зміст роботи викладений не завжди у логічній послідовності, в роботі зафіксовані незначні помилки, а власні висновки здобувача не завжди відповідають темі практичного завдання.

5 балів: виявлено помилки в розрахунково-аналітичних даних, зміст роботи викладено нечітко й нелогічно, але продемонстровані знання й уміння в межах навчальної програми.

0 балів: наведено неправильні розрахунково-аналітичні дані, до яких не надано жодних пояснень.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ

1 Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с..

2 Теорія різання [Електронний ресурс] : Підручник для студентів спеціальності 131 – Прикладна механіка / О. В. Глоба, В. В. Вовк, Д. А. Красновид, В. І. Солодкий. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 248 с.

3 Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів] / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І.Грабченко, В.Л. Доброскок, В.О. Залога, Ю.К. Новосьолов, Ф.Я. Якубов ; під заг. ред. М.П. Мазура. – 3-є вид. перероб. і доп. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.

4 Штельма О. М. Математичне моделювання і оптимізація : конспект лекцій (для студентів 2 курсу денної та заочної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» спеціальності 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології) / О. М. Штельма ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 56 с.

5 Моделювання та оптимізація систем: підручник /[Дубовой В. М., Кветний Р. Н., Михальов О. І., А.В.Усов А. В.] –Вінниця : ПП «ТД«Еднльвейс», 2017. – 804 с.

Навчальне видання

Дербаба Віталій Анатолійович
Богданов Олександр Олександрович

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ НА ВЕРСТАТАХ З ЧПК

Методичні рекомендації до виконання практичних робіт
для здобувачів ступеня магістра освітньо-наукової програми
«Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва»
спеціальності 131 Прикладна механіка

Видано в авторській редакції.

Електронний ресурс.
Підписано до видання 14.01.2025. Авт. арк. 3,2.

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
49005, м. Дніпро, просп. Дмитра Яворницького, 19.