

до захиску
23.05.2025
Богданов

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Механіко-машинобудівний факультет
Кафедра Технологій машинобудування та матеріалознавства
(повна назва)

ПОЯСНОВАЛЬНА ЗАПИСКА
кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувача вищої освіти Дударя Владислава Юрійовича
(ПІБ)

академічної групи 131М-23п-1
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка
(код і назва спеціальності)

за освітньо-науковою програмою
Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва
(офіційна назва)

на тему Оптимізація режимів різання для фрезерного верстата з ЧПК
при механічній обробці деталі «Корпус редуктора»

за наказом ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 № 317-С
(назва та наказом ректора)

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
розділів				
Аналітичний	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Технологічний	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Спеціальний	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Науково-дослідницький	Богданов О.О.	89	добре	Богданов
Рецензент	Анциферов О.В.	89	добре	Анциферов
Нормоконтролер	Рубан В.М.	89	добре	Рубан

Встановлено, що матеріали даної кваліфікаційної роботи містять чутливу інформацію щодо реальних об'єктів критичної інфраструктури України, національної безпеки і оборони України, зокрема відомості про їх місце розташування, службове призначення, конструкторську і технологічну документацію, описи конструкторських матеріалів та їх властивості, іншу додаткову літературу та посилання. У зв'язку з чим такі матеріали не підлягають відкритому оприлюдненню та мають зберігатися відповідно до встановленого режиму закладом освіти.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

ЗАТВЕРДЖЕНО:
завідувач кафедри
Технологій машинобудування та матеріалознавства

В.А. Дербабя
(підпис та печатка)

2025 року

ЗАВДАННЯ на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти Дударю В.Ю. академічної групи 131м-23и-1
(підпис та печатка) (номер)

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою
Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва
(офіційна назва)

на тему Оптимізація режимів різання для фрезерного верстата з ЧПК при механічній обробці деталі «Корпус редуктора»

1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ

Наказ ректора НТУ «Дніпровська політехніка» від 28.04.25 № 317-С

2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБИ

Об'єкт досліджень – процес фрезерної обробки деталі «Корпус редуктора» на фрезерному верстаті з ЧПК

Предмет досліджень – оптимальні режими різання (подача, частота обертання шпинделя) при механічній обробці корпусної деталі із чавуну

Мета – оптимізувати режими різання при фрезеруванні деталі «Корпус редуктора» на верстаті з ЧПК для підвищення ефективності обробки, зниження витрат та забезпечення необхідної якості поверхні

Вихідні дані для проведення роботи – креслення деталі «Корпус редуктора», дані про матеріал деталі, характеристики верстатів та різального інструменту, теоретичні та довідкові дані з оптимізації процесів різання

3 ОЧІКУВАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Новизна – встановлення оптимальних режимів різання при фрезеруванні деталі, вплив жорсткості інструменту на параметри режимів різання

Практична цінність – розробка методики визначення оптимальних параметрів режимів різання для умов серійного виробництва, зниження витрат на обробку

4 ВИМОГИ ДО РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Достовірність математичної моделі оптимізації режимів різання, отримання чітких рекомендацій щодо параметрів фрезерування, актуальність та відповідність обмеженням верстатного обладнання, використання сучасних програмних засобів моделювання

5 ЕТАПИ ВИКОНАННЯ РОБІТ

Найменування етапів робіт	Строки виконання робіт (початок-кінець)
Аналіз технологічності конструкції деталі	03.02.25-16.02.25
Проект технології обробки деталі	17.02.25-02.03.25
Розробка верстатного пристрою, складання специфікації	03.03.25-16.03.25
Оптимізація режимів різання при фрезеруванні	17.03.25-04.05.25

6 РЕАЛІЗАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ

Економічний ефект – оптимізація виробничого процесу, зниження зношування інструменту

Соціальний ефект – паліпшення умов праці за рахунок зменшення часу роботи, впровадження сучасних методів оптимізації

7 ДОДАТКОВІ ВИМОГИ

Забезпечення відповідності технологічного процесу стандартам ДСТУ, ISO, впровадження автоматизації та використання верстатів з ЧПК

Завдання видано


(підпис керівника)

О.О. Богданов
(підпис та прізвище)

Дата видачі

03.02.2025

Дата подання до екзаменаційної комісії

09.05.2025

Прийнято до виконання


(підпис керівника)

В.Ю. Дулар
(підпис та прізвище)

Вступ

На підприємствах машинобудування постійно шукають методи до підвищення ефективності та якості обробки деталей. Одним із ключових напрямів є використання верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК), які дозволяють досягати високої точності та продуктивності при механічній обробці. Однак для досягнення максимальної ефективності роботи на таких верстатах необхідно оптимізувати режими різання, включаючи фрезерування, яке є одним із найпоширеніших методів обробки.

Фрезерування на верстатах з ЧПК є складним процесом, що залежить від таких факторів, як матеріал заготовки, геометрія інструменту, швидкість різання, подача і глибина фрезерування. Неправильний вибір режимів обробки може призвести до зниження якості поверхні, прискореного зношування інструменту та економічних втрат. Тому актуальним завданням є розробка науково обґрунтованих підходів до оптимізації режимів фрезерування, які дозволять підвищити продуктивність, знизити собівартість та покращити якість обробки.

Метою даної роботи є дослідження та оптимізація режимів фрезерування на верстаті з ЧПК для досягнення найкращих показників якості обробки та продуктивності.

Робота пов'язана з науковим напрямом кафедри технологій машинобудування та матеріалознавства та виконана відповідно договору про співпрацю та договором про нерозголошення конфіденційної інформації та комерційної таємниці з ТОВ «ДТМ-ІНЖИНІРИНГ».

1 Аналітичний розділ

1.1 Характеристика об'єкту виробництва

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

товщиною стінки 10 мм: картерів, кришок, блоків циліндрів, гальмівних барабанів, головок і гільз циліндрів та інших деталей автомобіля та тракторобудування; станин, верстатів, розмічальних плит, гідроциліндрів, клапанів, основ верстатів, санок, столів у верстатобудуванні; вихлопних труб, маховиків, фундаментальних рам картерів, кришок робочих циліндрів, блоків та інших відповідальних деталей дизелебудування; кришок редукторів, зубчастих коліс, шестерень, шківів, маховиків (при швидкості не більше 3,5 м/с), рам редукторів, муфт зчеплення, парових циліндрів та інших середньо навантажених деталей хімічне машинобудування; деталей працюючих при стисканні (черевиків, колон) у будівництві; різних труб та радіаторів опалення; виливок для парових стаціонарних турбін, турбінного обладнання АЕС, елементів парових котлів та трубопроводів, гідравлічних турбін, гідро затворів та іншого обладнання енергомашинобудування: виливок 3 групи, що піддаються статичним навантаженням і виливків, що працюють в умовах пари води і масла при температурі до 70°C (корпусів колонок, корпусів

підшипників, рам підшипників, рам фундаментів, вкладишів, втулок, стійок, патрубків, кожухів); виливків 2 групи, що працюють при температурах до 250°C, піддаються підвищеним статичним і динамічним навантаженням і тертям (поршнів, корпусів редукторів, корпусів підшипників, корпусів черв'ячних коліс, втулок, кришок підшипників, патрубків компресорів, діафрагм, рам фундаментних, рам вихлопних частин, патрубків компресорів, зубчастих коліс, шестерень); виливок деталей трубопровідної арматури та приводних пристроїв до ній; виливок деталей гірничо-металургійного обладнання; частин литих з'єднувальних для трубопроводів [2, 3].

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

1.2 Аналіз технологічності конструкції деталі

Оцінка конструкції деталі на технологічність буває двох видів: якісна та кількісна.

Якісна оцінка виконується технологом на підставі досвіду виробництва і полягає: чи зручно з технічної точки зору досягати задану конструктором форму деталі, забезпечити точність та якість обробки; чи можлива обробка заданої деталі на стандартному устаткуванні, стандартним різальним інструментом та ін. [4, 5].

1) Якісна оцінка технологічності.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

недолки щодо технологічності.

- форма і розташування отворів $\varnothing 170\text{-H7}$ та $\varnothing 110\text{-H7}$ зручні для обробки з одного боку заготовки, а отвір $\varnothing 140\text{-G7}$ – для обробки з іншого боку заготовки. Таким чином обробка групи отворів може вестися або з 2-х сторін одночасно.

- труднощі викликає обробка отворів з нарізанням різьблення M10H7. У зв'язку з тим, що ці отвори глухі, можливі поломки інструменту.

- нетехнологічна обробка поверхні роз'єму, що потребує складне верстатне пристосування.

Інші оброблювані поверхні з точки зору забезпечення точності та шорсткості не становлять технологічних труднощів, дозволяють вести обробку на прохід і дають можливість обробляти кілька деталей одночасно високопродуктивними методами.

Таким чином, конструкція деталі «Корпус редуктора» є технологічною з якісної оцінки.

2) Кількісна оцінка технологічності.

Кількісна оцінка проводиться за такими показниками технологічності, як коефіцієнт точності, коефіцієнт шорсткості, коефіцієнт використання матеріалу.

- Коефіцієнт точності.

Деталь вважається технологічною за точністю, якщо виконується умова:

$$K_T = 1 - \frac{1}{T_{cp}} \geq 0,8,$$

де T_{cp} – середній квалітет розмірів деталі.

$$T_{cp} = \frac{\sum T_i \cdot n_i}{\sum n_i},$$

де n_i – кількість розмірів кожного квалітету.

$$T_{cp} = \frac{6 \cdot 3 + 7 \cdot 2 + 8 \cdot 3 + 11 \cdot 1 + 14 \cdot 5}{14} = 9,79$$

$$K_T = 1 - \frac{1}{9,79} = 0,898 > 0,8$$

$0,898 > 0,8$ – за показником точності деталь технологічна.

- Коефіцієнт шорсткості.

Деталь вважається технологічною за шорсткістю, якщо виконується умова:

$$K_{ш} = \frac{1}{Ш_{ср}} \leq 0,32 ,$$

де $Ш_{ср}$ – середня шорсткість.

$$Ш_{ср} = \frac{\sum Ш_{ср} \cdot ni}{\sum ni}$$
$$Ш_{ср} = \frac{12,5 \cdot 2 + 6,3 \cdot 3 + 3,2 \cdot 6 + 1,6 \cdot 1}{12} = 5,39$$
$$K_{ш} = \frac{1}{5,39} = 0,186 < 0,32$$

$0,186 < 0,32$ – за показником шорсткості деталь технологічна.

- Коефіцієнт використання матеріалу заготовки:

$$КВМ = \frac{M_{д}}{M_{з}} \geq 0,8 \text{ (для лиття),}$$

де $M_{д} = 45$ – маса деталі, кг;

$M_{з} = 47$ – маса заготовки, кг.

$$КВМ = \frac{45}{47} = 0,96.$$

$0,96 > 0,8$ – за показником використання матеріалу деталь технологічна.

За кількісною оцінкою деталь «Корпус редуктора» – технологічна.

1.3 Висновки

На підставі проведеного аналізу конструкції деталі на технологічність, хімічного складу і механічних властивостей матеріалу робимо висновок, що деталь «Корпус редуктора» – технологічна.

2 Технологічний розділ

2.1 Встановлення виробничої програми випуску деталей

Програма випуску деталі «Корпус редуктора» становить $N = 5000$ шт/рік.

Детальна програма виробів визначається за формулою [4, 5]:

$$N = N_p \cdot m \cdot \left(1 + \frac{h}{100}\right),$$

де $N_p = 5000$ – кількість виробів виготовлених на рік, шт.;

$m = 1$ – кількість деталей на одну машину, шт.;

$h = 2$ – кількість деталей запасних частин, %.

$$N = 5000 \cdot 1 \cdot \left(1 + \frac{2}{100}\right) = 5100 \text{ шт.}$$

Такт виробництва визначимо за формулою:

$$t_B = \frac{60 \cdot \Phi_D}{N},$$

де $\Phi_D = 2080$ - річний фонд роботи обладнання, годин.

$$t_B = \frac{60 \cdot 2080}{5100} = 24,5 \text{ хв.}$$

Розмір партії визначимо за формулою:

$$n = \frac{N \cdot a}{\Phi};$$

де $N = 5100$ – річна програма випуску, шт.;

$a = 5$ – періодичність запуску деталей у виробництво, днів;

$\Phi = 260$ – число робочих днів у році.

$$n = \frac{5100 \cdot 5}{260} = 98 \text{ шт.}$$

Згідно [4, 5] за масою 47 кг і $N = 5000$ шт/рік – тип виробництва середньо серійне.

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

2.3 Розрахунок припусків на механічну обробку

Виконаємо розрахунок припусків на обробку отвору $\varnothing 170-7G$ та зведемо отримані дані до таблиці 2.1.

Сумарне значення Rz та T , що характеризують якість поверхні литих заготовок, становить 600 мкм. Після першого технологічного переходу, для деталей з чавуну, T виключається з розрахунків, тому для чорнового та чистового розточування знаходимо з довідників [8], значення Rz відповідно 50 і 10 мкм, і записуємо їх в розрахункову таблицю.

Просторові похибки:

$$\text{- на отвір} \quad \rho = \sqrt{\rho_{\text{кор}}^2 + \rho_{\text{см}}^2},$$

де $\rho_{\text{кор}}$ – жолоблення виливки, мм;

$\rho_{\text{см}}$ – зміщення стрижня, мм.

Короблення отвору слід враховувати як в діаметральному, так і в осьовому перерізі, тому:

$$\rho_{кор} = \sqrt{(\Delta_k \cdot d)^2 + (\Delta_k \cdot l)^2},$$

де $\Delta_k = 0,7-1$ – питома величина короблення, мкм/мм,

l і d – довжина і діаметр отвору, що розточується, мм.

$$\rho_{кор} = \sqrt{(0,7 \cdot 170)^2 + (0,7 \cdot 100)^2} = 138 \text{ мкм}$$

Зміщення стрижня, що утворюють отвори, приймається рівною допуску на максимальний розмір від осі отвору, до вимірювальної бази з урахуванням найбільших розмірів виливки:

$$\rho_{cv} = 707 \text{ мкм.}$$

Сумарне значення просторового відхилення заготовки:

$$\rho_3 = \sqrt{138^2 + 707^2} = 720$$

Залишкове просторове відхилення після чорнового розточування:

$$\rho_1 = 0,05\rho_3; \quad \rho_1 = 0,05 \cdot 720 = 36 \text{ мкм}$$

Похибка установки при чорновому розточуванні:

$$E_1 = 200 \text{ мкм.}$$

Залишкова похибка установки при чистовому розточуванні:

$$E_2 = 0,05 \cdot E_1 + E_{інд},$$

Чорнове та чистове розточування відбувається за два установи:

$$E_{інд} = 20 \text{ мкм,}$$

$$E_2 = 0,05 \cdot 200 + 20 = 30 \text{ мкм.}$$

Мінімальний припуск при обробці внутрішніх поверхонь обертання:

$$2Z_{\min} = 2(R_{zi-1} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2})$$

де R_{zi-1} – висота нерівностей профілю на попередньому переході,

T_{i-1} – глибина дефектного шару на попередній перехід,

R_{i-1} – сумарне значення просторових відхилень на попередніх переходах,

E_i – похибка установки заготовки при переході.

Мінімальний припуск під чорнове розточування:

$$2Z_{1\min} = 2(600 + \sqrt{720^2 + 200^2}) = 2 \cdot 1347 \text{ мкм}$$

Таким чином, маючи розрахунковий розмір після останнього переходу (в даному випадку чистового розточування 170,054 мкм) для інших переходів отримуємо:

- для чорнового розточування:

$$d_{p1} = 170,054 - 0,192 = 169,862 \text{ мм},$$

- для заготівлі:

$$d_{p3} = 169,862 - 2,694 = 167,168 \text{ мм}.$$

Для чистового розточування значення допуску становить 40 мкм (креслення), для чорнового розточування $TP1 = 260$ мкм, допуск на отвір у виливку складає $T_{от} = 1100$ мкм.

Таблиця 2.1 – Визначення припусків на обробку для поверхні $\varnothing 170G7$

Поверхня $\varnothing 170G7$	Елементи припуску, мкм				$2Z_{\min}$, мкм	d_p , мм	T, мкм	Граничний розмір	
	R_z	T	ρ	E				d_{\min}	d_{\max}
Заготовка	600		720			167,168	1100	166,07	167,17
розточування:									
чорнове	50		36	200	2·134	169,862	260	169,6	168,86
чистове	10			30	2·96	170,054	40	170,014	170,05

Припуски на обробку інших поверхонь приведені в таблиці 2.2.

Поверхні, що оброблюються приведені на рисунку 2.1.

2.4 Розробка маршруту виготовлення деталі

Розробка маршруту виготовлення деталі – це процес планування і організації технологічних операцій для виготовлення деталі згідно з кресленням та технічними вимогами. Цей маршрут є основою технологічного процесу і включає всі етапи, починаючи від підготовки матеріалу до отримання готового виробу.

Технологічний процес складається з послідовності операцій, які забезпечують перетворення заготовки на готову деталь.

Основні етапи:

- Підготовчі операції :

Підготовка заготовки (розкрій, зачистка, маркування).

- Основні операції :

Механічна обробка (точіння, фрезерування, свердління, шліфування тощо).

Термічна або хіміко-термічна обробка (якщо потрібно).

- Заключні операції :

Контроль якості (вимірювання розмірів, перевірка шорсткості, допусків).

Завершальна обробка (полірування, фарбування, покриття) [4, 5].

Маршрут обробки поверхонь деталі приведено в таблиці 2.3, характеристика верстата – 2.4, зміст технологічних переходів та оснащення операцій – 2.5, загальний вигляд верстата – рисунок 2.2.

Таблиця 2.3 – Маршрут обробки поверхонь деталі

Номер операції	Найменування операції	Верстат	Вид обробки та номер поверхні (рис. 2.1)
005	Вертикально-фрезерна	HAAS VF-4	Обробка базової площини поверхня 1 (низ)
010	Вертикально-фрезерна	HAAS VF-4	Обробка поверхонь 2, 3
015	Свердлильна	HAAS VF-4	Свердління, розгортання поверхонь 4
020	Агрегатна	HAAS VF-4	Розточування поверхонь 5, 6, 7, 10
025	Агрегатна	HAAS VF-4	Свердління, різьбонарізання поверхонь 8, 9
030	Свердлильна	HAAS VF-4	Розточування, свердління, різьба поверхонь 11, 12
035	Контрольна	Стіл ВТК	Контроль поверхонь

Таблиця 2.4 – Технічні характеристики верстата HAAS VF-4 [9]

Найменування параметру	Значення
Система керування	HAAS Control
Робочі ходи: вісь X, мм	1270
Робочі ходи: вісь Y, мм	508
Робочі ходи: вісь Z, мм	635
Довжина столу, мм	1321
Ширина столу, мм	495
Максимальне різання, м/хв.	16,5
Швидкі рухи на X, м/хв.	25,4
Швидкі рухи на Y, м/хв.	25,4
Швидкі рухи на Z, м/хв.	25,4
Максимальний крутний момент, Нм	122
Кількість інструментів	20
Швидкість обертання шпинделя, об/хв.	8100
Максимальна потужність, кВт	22,4
Розміри верстата, мм	3870×2510×2690
Маса, кг	5316



Рисунок 2.2 – Загальний вигляд верстата HAAS VF-4 [9]

Таблиця 2.5 – Зміст технологічних переходів та оснащення операцій

Номер та назва операції	Зміст технологічних переходів	Оснащення, різальний інструмент [10], вимірювальний інструмент
005 Вертикально-фрезерна	Установити заготовку, обробити базову площину (поверхня 1) до Ra 1,6	Фреза: Sandvik CoroMill® 345 Ø125 мм, 6 пластин, GC1030 (345-125Q50-12M) Вимірювання: цифровий індикатор та штангенциркуль Mitutoyo 500-196-30
010 Вертикально-фрезерна	Фрезерування бокових торців (пов. 2 і 3), розмір 550±0,05 мм	Фреза: TaeguTec CHASEMILL FM90-125-6T, пластини TT9080 Вимірювання: штангенциркуль Mitutoyo, Ра-плівка
015 Свердлильна	Свердління Ø15.8 мм та розгортання до Ø16 H8 (2 отвори)	Свердло: Sandvik CoroDrill® 880 Ø15,8 мм, 880-WH Розгортка: CoroReamer® 435 Ø16 мм H8 Вимірювання: нутромір Mitutoyo 511-411
020 Агрегатна	Розточування отворів Ø140, Ø170, Ø175, Ø200, Ø212 (G7)	Розточка: Sandvik CoroBore® 825 (Ø140–Ø212), вставки GC4325 Вимірювання: телескопічний нутромір Mitutoyo 511-703, 3-точковий мікрометр
025 Агрегатна	Свердління Ø8,5 мм, нарізання різьби M10	Свердло: TaeguTec DRILL-RUSH Ø8.5 мм, TT9030 Мітчик: CoroTap® 200 M10 HSS-E Вимірювання: різьбомір, штангенциркуль
030 Свердлильна	Розточка Ø185, Ø212 та нарізання різьби M12, M16 (12 отворів)	Розточка: CoroBore® 825, вставки GC4325 Мітчики: CoroTap® 300 M12, M16 HSS-PM Вимірювання: нутромір, калібр різьби
035 Контрольна	Контроль поверхонь деталі	

2.5 Детальна розробка технологічних операцій

Призначення та розрахунок режимів різання полягає у виборі найбільш вигідного поєднання швидкості різання та подачі, що забезпечують на обраному обладнанні та інструменті найвищу продуктивність і найменшу вартість операції при дотриманні технічних умов на виготовлення деталі. Схеми визначення режимів різання для одноінструментальної обробки на токарних, карусельних, розточувальних, свердлильних, фрезерних та інших верстатах незначно відрізняються одна від одної. Спочатку уточнюються матеріал і геометричні параметри ріжучого інструменту, далі встановлюють глибину різання та кількість проходів, потім подачу і, в останню чергу, швидкість та потужність різання. Комплекс нормативних матеріалів з визначення режимів різання представлений у стандартах, загальномашинобудівних нормативах режимів різання та довідниках [11-13].

Операція 005. Вертикально-фрезерна

Верстат HAAS VF-4.

1-ий перехід: чорнове фрезерування поверхні роз'єму корпусу.

Фреза $\varnothing 125$ мм $z = 6$

Глибина різання $t = 1,5$ мм.

Ширина фрезерування = 410 мм.

1. Подача $S_z = 0,12$ мм/зуб

Поправочні коефіцієнти:

$K_{Ms} = 0,89$; $K_{Mv} = 0,8$

$S_z = S_z \cdot K_{Ms} \cdot K_{Mv} = 0,12 \cdot 0,89 \cdot 0,8 = 0,09$ мм/зуб

2. Швидкість різання.

$V = 160$ м/хв.

Поправочні коефіцієнти:

$K_{Ms} = 0,89$; $K_{Mv} = 0,8$.

$$V = V \cdot K_{MS} \cdot K_{MV} = 160 \cdot 0,89 \cdot 0,8 = 114 \text{ м/хв.}$$

3. Частота обертання.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 114}{3,14 \cdot 125} = 290 \text{ об/хв.}$$

4. Швидкість різання.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 290}{1000} = 114 \text{ м/хв.}$$

5. Хвилинна подача.

$$S_{ХВ.} = S_z \cdot z \cdot n = 0,09 \cdot 6 \cdot 290 = 157 \text{ мм/хв.}$$

6. Подача на зуб.

$$S_z = \frac{S_{ХВ.}}{z \cdot n} = \frac{157}{6 \cdot 290} = 0,09 \text{ мм/зуб}$$

7. Основний час.

$$T_o = \frac{l_o}{V} = \frac{1590}{114} = 13,95 \text{ хв.}$$

2-ий перехід: чистове фрезерування поверхні роз'єму корпусу

Фреза $\varnothing 125$ мм $z = 6$

Глибина різання $t = 1$ мм.

Ширина фрезерування = 410 мм.

1. Подача $S_z = 0,88$ мм/зуб.

Поправочні коефіцієнти.

$$K = 0,89$$

$$S_z = S_z \cdot K = 0,88 \cdot 0,89 = 0,78 \text{ мм/зуб}$$

2. Швидкість різання.

$$V = 160 \text{ м/хв}$$

Поправочні коефіцієнти.

$$K_{MS} = 0,89; K_{MV} = 1$$

$$V = V \cdot K_{MS} \cdot K_{MV} = 160 \cdot 0,89 \cdot 1 = 142,4 \text{ м/хв.}$$

3. Частота обертання.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 142,4}{3,14 \cdot 125} = 363 \text{ об/хв.}$$

4. Швидкість різання окружна.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 363}{1000} = 142,5 \text{ м/хв.}$$

5. Хвилинна подача.

$$S_{хв.} = S_z \cdot z \cdot n = 0,78 \cdot 6 \cdot 363 = 1699 \text{ мм/хв.}$$

Приймаємо $S_{хв.} = 1700 \text{ мм/хв.}$

6. Подача на зуб.

$$S_z = \frac{S_{хв.}}{z \cdot n} = \frac{1700}{6 \cdot 363} = 0,78 \text{ мм/зуб.}$$

7. Основний час.

$$T_o = \frac{l_o}{V} = \frac{1590}{142,5} = 11,2 \text{ хв.}$$

Операція 010. Вертикально-фрезерна

Верстат HAAS VF-4

1-ий перехід: чорнове фрезерування поверхні фланців корпусу

Фреза $\varnothing 125 \text{ мм } z = 6$

Глибина різання $t = 1 \text{ мм.}$

Ширина фрезерування = 190 мм.

1. Подача $S_z = 0,12 \text{ мм/зуб}$

Поправочні коефіцієнти.

$$K = 0,89$$

$$S_z = S_z \cdot K = 0,12 \cdot 0,89 = 0,11 \text{ мм/зуб}$$

2. Швидкість різання.

$$V = 160 \text{ м/хв.}$$

Поправочні коефіцієнти.

$$K_{MS} = 0,77; K_{MV} = 0,8$$

$$V = V \cdot K_{MS} \cdot K_{MV} = 160 \cdot 0,77 \cdot 0,8 = 98,56 \text{ м/хв.}$$

3. Частота обертання.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 98,56}{3,14 \cdot 125} = 251 \text{ об/хв.}$$

4. Швидкість різання окружна.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 251}{1000} = 98,5 \text{ м/хв.}$$

Приймаємо: $V = 100 \text{ м/хв.}$

5. Хвилинна подача.

$$S_{\text{хв.}} = S_z \cdot z \cdot n = 0,11 \cdot 6 \cdot 125 = 82,5 \text{ мм/хв.}$$

Приймаємо $S_{\text{хв.}} = 83 \text{ мм/хв.}$

6. Подача на зуб.

$$S_z = \frac{S_{\text{хв.}}}{z \cdot n} = \frac{82,5}{6 \cdot 251} = 0,05 \text{ мм/зуб}$$

7. Основний час.

$$T_0 = \frac{l_0}{V} = \frac{190}{100} = 1,9 \text{ хв.}$$

2-ий перехід: чистове фрезерування поверхні фланців корпусу

Фреза $\varnothing 125 \text{ мм } z = 6$

Глибина різання $t = 1 \text{ мм.}$

Ширина фрезерування = 190 мм.

1. Подача $S_z = 0,8 \text{ мм/зуб}$

Поправочні коефіцієнти.

$$K = 0,89$$

$$S_z = S_z \cdot K = 0,8 \cdot 0,89 = 0,71 \text{ мм/зуб}$$

2. Швидкість різання.

$$V = 100 \text{ м/хв.}$$

Поправочні коефіцієнти.

$$K_{\text{MS}} = 0,89; K_{\text{MV}} = 1$$

$$V = V \cdot K_{\text{MS}} \cdot K_{\text{MV}} = 100 \cdot 0,89 \cdot 1 = 89 \text{ м/хв.}$$

3. Частота обертання.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 100}{3,14 \cdot 125} = 255 \text{ об/хв.}$$

4. Швидкість різання окружна.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 251}{1000} = 98,5 \text{ м/хв.}$$

Приймаємо: $V = 100 \text{ м/хв.}$

5. Хвилинна подача.

$$S_{\text{хв.}} = S_z \cdot z \cdot n = 0,71 \cdot 6 \cdot 255 = 1086,3 \text{ мм/хв.}$$

Приймаємо $S_{\text{хв.}} = 1100 \text{ мм/хв.}$

6. Подача на зуб.

$$S_z = \frac{S_{\text{хв.}}}{z \cdot n} = \frac{1100}{6 \cdot 255} = 0,72 \text{ мм/зуб}$$

7. Основний час.

$$T_o = \frac{l_o}{V} = \frac{190}{100} = 1,9 \text{ хв.}$$

3-ий перехід: чорнове фрезерування поверхні фланців корпусу

Фреза $\varnothing 125 \text{ мм } z = 6$

Глибина різання $t = 2 \text{ мм.}$

Ширина фрезерування = 150 мм.

1. Подача $S_z = 0,25 \text{ мм/зуб}$

Поправочні коефіцієнти.

$$K = 0,89$$

$$S_z = S_z \cdot K = 0,25 \cdot 0,89 = 0,22 \text{ мм/зуб}$$

2. Швидкість різання.

$$V = 160 \text{ м/хв.}$$

Поправочні коефіцієнти.

$$K_{\text{MS}} = 0,77; K_{\text{MV}} = 0,8$$

$$V = V \cdot K_{\text{MS}} \cdot K_{\text{MV}} = 160 \cdot 0,77 \cdot 0,8 = 98,6 \text{ м/хв.}$$

3. Частота обертання.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 98,6}{3,14 \cdot 125} = 251 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо $n = 250$ об/хв.

4. Швидкість різання окружна.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 250}{1000} = 98,1 \text{ м/хв.}$$

Приймаємо $V = 100$ м/хв.

5. Хвилинна подача.

$$S_{хв.} = S_z \cdot z \cdot n = 0,22 \cdot 6 \cdot 250 = 330 \text{ мм/хв.}$$

Приймаємо $S_{хв.} = 330$ мм/хв.

6. Подача на зуб.

$$S_z = \frac{S_{хв.}}{z \cdot n} = \frac{330}{6 \cdot 255} = 0,22 \text{ мм/зуб}$$

7. Основний час.

$$T_o = \frac{l_o}{V} = \frac{150}{100} = 1,5 \text{ хв.}$$

4-ий перехід: чистове фрезерування поверхні фланців корпусу

Фреза $\varnothing 125$ мм $z = 6$

Глибина різання $t = 1$ мм.

Ширина фрезерування = 150 мм.

1. Подача $S_z = 0,8$ мм/зуб.

Поправочні коефіцієнти.

$$K = 0,89$$

$$S_z = S_z \cdot K = 0,8 \cdot 0,89 = 0,71 \text{ мм/зуб}$$

2. Швидкість різання.

$$V = 100 \text{ м/хв.}$$

Поправочні коефіцієнти.

$$K_{MS} = 0,89; K_{MV} = 1$$

$$V = V \cdot K_{MS} \cdot K_{MV} = 100 \cdot 0,89 \cdot 1 = 89 \text{ м/хв.}$$

3. Частота обертання.

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 89}{3,14 \cdot 125} = 227 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо $n = 230$ об/хв.

4. Швидкість різання окружна.

$$V = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 230}{1000} = 90,3 \text{ м/хв.}$$

Приймаємо $V = 90$ м/хв.

5. Хвилинна подача.

$$S_{хв.} = S_z \cdot z \cdot n = 0,71 \cdot 6 \cdot 125 = 979,8 \text{ мм/хв.}$$

Приймаємо $S_{хв.} = 1000$ мм/хв.

6. Подача на зуб.

$$S_z = \frac{S_{хв.}}{z \cdot n} = \frac{1000}{6 \cdot 230} = 0,73 \text{ мм/зуб}$$

7. Основний час.

$$T_o = \frac{l_o}{V} = \frac{150}{90} = 1,7 \text{ хв.}$$

Розрахунок норм часу.

Операція 005 Фрезерна.

1. Основний час.

$$T_o = 13,95 + 11,2 = 25,15 \text{ хв.}$$

2. Час на встановлення та зняття.

$$T_{в1} = 3,7 \text{ хв.}$$

3. Час на контроль розмірів.

$$T_{в2} = 2 \text{ хв.}$$

4. Час на переходи.

Увімкнення та вимкнення верстата: $T_{в3} = 0,06$ хв.

Час на перебіг інструменту: $T_{в4} = 0,03 \cdot 4 = 0,12$ хв.

5. Час кріплення

$$T_{в5} = 0,62 \text{ хв.}$$

Сумарний час

$$\Sigma T_{\text{в}} = 3,7 + 2 + 0,06 + 0,12 + 0,62 = 6,5 \text{ хв.}$$

6. Час на відпочинок та інші потреби 6% від Топ.

$$7. T_{\text{шт}} = (T_{\text{о}} + T_{\text{в}} \cdot K_{\text{в}}) \cdot (1 + 6/100) = (25,15 + 6,5 \cdot 0,87) \cdot 1,06 = 32,7 \text{ хв.}$$

8. Тп.з. = 16 хв.

Операція 010.

1. Основний час.

$$T_{\text{о}} = 1,9 + 1,9 + 1,5 + 1,7 = 7 \text{ хв.}$$

2. Час на встановлення, зняття.

$$T_{\text{в1}} = 13,7 \text{ хв.}$$

3. Час на контроль розмірів.

$$T_{\text{в2}} = 2 \text{ хв.}$$

4. Час на переходи

Увімкнення та вимкнення верстата: $T_{\text{в3}} = 0,03 \text{ хв.}$

Час на перебіг інструменту: $T_{\text{в4}} = 0,06 \text{ хв.}$

5. Час кріплення.

$$T_{\text{в5}} = 0,62 \text{ хв.}$$

Сумарний час

$$\Sigma T_{\text{в}} = 13,7 + 2 + 0,03 + 0,06 + 0,62 = 16,41 \text{ хв.}$$

6. Час на відпочинок та інші потреби 6% від Топ.

$$7. T_{\text{шт}} = (T_{\text{о}} + T_{\text{в}} \cdot K_{\text{в}}) \cdot (1 + 6/100) = (7 + 6,5 \cdot 0,87) \cdot 1,06 = 13,4 \text{ хв.}$$

8. Тп.з. = 16 хв.

Розраховані режими різання та норми часу для операцій механічної обробки деталі приведено в таблицях 2.6 та 2.7.

Таблиця 2.6 – Режими різання

Операція	t, мм	Sz, мм/зуб; So, мм/об	Sхв, мм/хв.	V, м/хв.	n, об/хв.
005 Вертикально-фрезерна					
1-й (410 мм)	1,5	0,09	157	114	290
2-й (410 мм)	2	0,78	1700	142,5	363
010 Вертикально-фрезерна					
1-й (190 мм)	1	0,05	83	98,5	251
2-й (190 мм)	1	0,71	1100	98,5	255
3-й (150 мм)	2	0,22	330	100	250
4-й (150 мм)	1	0,73	1000	90	230
015 Свердлильна					
1-й (отв. Ø15,75 мм)	25	0,3		25	500
2-й (отв. Ø16 мм)	25	0,2		10	125
020 Агрегатна					
1-й (отв. Ø160 мм)		0,27	30	60	125
2-й (отв. Ø100 мм)		0,27	30	40	160
1-й (отв. Ø169 мм)		0,27	50	100	180
2-й (отв. Ø100 мм)		0,27	50	60	180
1-й (отв. Ø175 мм)		0,1	6	30	60
025 Агрегатна					
1-й (отв. Ø10,2 мм)	25	0,11		25	872
2-й (отв. Ø14 мм)	6	0,11		30	730
030 Свердлильна					
1-й (отв. Ø8,5 мм)	18	0,125		30	1250
2-й (отв. Ø8,5 мм)	35	0,125		30	1250
3-й (M10)	15	1,75		4,6	185
4-й (M10)	30	1,75		4,6	185

Таблиця 2.7 – Норми часу

№ опер.	Найменування операції	Тосн, хв.	Тв, хв.	Тшт, хв.	Тп.з., хв.
005	Вертикально-фрезерна	25,15	6,5	32,7	16
010	Вертикально-фрезерна	7	16,41	13,4	16
015	Свердлильна	11,04	4,4	6,3	18
020	Агрегатна	8,63	2,1	23,4	22
025	Агрегатна	0,9	4,16	15,3	12
030	Свердлильна	4,54	6,55	11,7	18

2.6 Висновки

В даному розділі проведено вибір і обґрунтування методу отримання заготовки, розраховано припуски на механічну обробку, розроблено маршрут обробки деталі, режими різання та норми часу.

3 Спеціальний розділ

Проектується верстатне пристосування для установки (базування і закріплення) деталі «Корпус редуктора» на операції 005 Вертикально-фрезерна для обробки площини роз'єму. Проектований пристрій повинен забезпечувати: точну установку та надійне закріплення заготовки щодо верстата та різального інструменту з метою отримання необхідної точності, зручності встановлення, закріплення та зняття заготовки.

Верстатне пристосування буде розміщатися на верстаті.

Операція виконується на верстаті HAAS VF-4.

Здійснюється фрезерування поверхні шириною 410 мм, довжина заготовки 586 мм, шорсткість торців заготовки $Ra = 1,6$ мкм.

3.1 Опис пристосування

Верстатний пристрій служить для встановлення та закріплення деталі «Корпус редуктора» на операції 005 Вертикально-фрезерна.

Базовою деталлю пристосування є корпус, що отримується зварюванням з окремих елементів. Для підвищення жорсткості та міцності в корпусі застосовані ребра жорсткості та технологічні вікна.

Для притиску деталі використовується Г-подібне прихвату, зусилля на який передається за допомогою гідроциліндра.

Для фіксації деталі застосовано бічні прихвати, зусилля на які передається за допомогою гідроциліндрів. Деталь фіксується на 3 упори, які розташовані за контуром деталі.

Управління гідросистемою пристосування здійснюється за допомогою гідропанелі, поворотом рукоятки якої проводиться підведення або відведення масла.

Пристосування встановлюється на стіл та фіксується за допомогою шпонок.

Підйом і транспортування пристрою здійснюється за допомогою рим-болтів.

Схема базування та закріплення заготовки приведена на рисунку 3.1.

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

рисунок 3.1 – Схема базування та закріплення заготовки

3.2 Розрахунок пристосування

Розраховуємо зусилля затиску (прихвату 1):

$$Q = \frac{K \cdot P_{\text{різ}} \cdot r_1}{\phi_1 \cdot r_2}$$

де K - коефіцієнт зусилля затиску;

$P_{\text{різ}}$ – сила різання;

r_1, r_2, r_3 - радіуси дотику;

ϕ_1, ϕ_2 - коефіцієнти тертя;

$r_1 = 170$ мм;

$r_2 = 200$ мм;

$P_{\text{різ}} = 2570$ Н;

$\phi_1 = 0,3$ – сталь за чавуном.

$$Q_1 = \frac{2,8 \cdot 2570 \cdot 0,17}{0,2 \cdot 0,3} = 20389 \text{ Н}$$

Розраховуємо гідроциліндр (прихват 1):

Приймаємо тиск мастила $\rho = 6 \text{ МПа}$.

Розраховуємо діаметр гідроциліндра:

$$D = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot \rho \cdot \eta}}$$

де Q - зусилля затиску (Н),

ρ - тиск мастила (МПа).

$$D_1 = 2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 20389}{3,14 \cdot 6 \cdot 0,9}} = 49,04 \text{ мм}$$

Приймаємо діаметр поршня гідроциліндра 50 мм.

Обираємо стандартний гідроциліндр двосторонньої дії за ISO 3320 з діаметром поршня $\varnothing 50 \text{ мм}$.

Технічна характеристика гідроциліндра:

Діаметр поршня – 50 мм,

Діаметр штока – 28 мм,

Хід поршня не більше – 110 мм.

Реалізована сила на штоку гідроциліндра при робочому тиску 6,3 МПа:

- сила, що штовхає – 11,78 кН;
- сила, що тягне – 8,09 кН.

3.3 Розрахунок пристосування на точність

Для визначення точності пристосування знаходимо сумарну похибку, яку можна допустити в пристрої для забезпечення точності заданого розміру. Сума $\Sigma\Delta_i$ цих похибок не повинна перевищити величини заданого допуску одержуваного розміру. Розмір, який отримуємо при обробці в даному пристосуванні $55\pm 0,3\text{мм}$ ($\delta = 0,3$).

Повинна виконуватися умова:

$$\Sigma\Delta_i \leq \delta$$

Похибки, що входять до $\Sigma\Delta_i$ наступні:

$$\Sigma\Delta_i = k_1 \cdot \Delta_{\text{баз}} + (\Delta_{\text{кр}} + \Delta_{\text{уст.д}}) + \Delta_{\text{обр}} + \Delta_{\text{пр}},$$

де $\Delta_{\text{баз}} = 0$ – похибка базування.

$\Delta_{\text{кр}}$ та $\Delta_{\text{уст.д}}$ – похибки закріплення та встановлення деталі у пристосуванні.

Приймаємо $(\Delta_{\text{кр}} + \Delta_{\text{уст.д}}) = 0,2$ мм.

$\Delta_{\text{обр}}$ – похибка обробки.

$$\Delta_{\text{обр}} = k_2 \cdot \Delta_{\text{ек}},$$

де $\Delta_{\text{ек}}$ – економічна точність обробки,

$k_2 = 0,5-0,7$ – коефіцієнт, що залежить від точності виготовлення аналізованого розміру. Чим вища точність виливки, тим більше приймаємо коефіцієнт. Приймаємо $k_2 = 0,5$.

$$\Delta_{\text{обр}} = 0,5 \cdot 0,1 = 0,05 \text{ мм}$$

$\Delta_{\text{пр}}$ – сумарна похибка пристосування.

$$\Delta_{\text{пр}} = \delta_i + \Delta_z,$$

де $\delta_i = 0,048$ мм – похибка виготовлення окремих елементів пристосування,

$\Delta_z = 0$ мм – похибка обумовлена наявністю зазору між посадковими

елементами пристосування і поверхнями, що базують деталі.

$$\Sigma \Delta_i = 0 + 0,2 + 0,05 + 0,048 = 0,298 \leq 0,3.$$

Умова виконується.

3.4 Висновки

В даному розділі спроектовано верстатний пристрій для фрезерування площини роз'єму. Проведено розрахунок пристосування, виконано кресленик та специфікацію.

4 Науково-дослідницький розділ

4.1 Постановка задачі дослідження

Актуальність теми. У сучасних умовах високої конкуренції в машинобудуванні особливої уваги набуває підвищення ефективності механічної обробки деталей, зокрема фрезерування корпусних елементів із чавуну. Одним із шляхів досягнення цього є оптимізація режимів різання. Від правильного вибору режимів залежить не лише продуктивність обробки, але й її якість, довговічність інструменту та собівартість виробу. У зв'язку з цим дослідження методів оптимізації режимів різання для фрезерної обробки корпусу редуктора на верстатах із ЧПК є актуальним завданням, що дозволяє підвищити конкурентоспроможність виробництва та знизити витрати.

Огляд джерел за темою дослідження. Проблематика оптимізації режимів різання при фрезеруванні деталей із чавуну широко розглядається у науковій літературі. Основна увага дослідників спрямована на підвищення ефективності процесу шляхом оптимізації подачі, швидкості різання, глибини різання, вибору інструментів та застосування математичних методів оптимізації.

Smith (2016) розглянув оптимізацію параметрів фрезерування деталей із чавуну на основі мінімізації собівартості обробки та максимізації стійкості інструмента [14].

Ahmed, Patel і Sharma (2018) застосували багатокритеріальні методи оптимізації для визначення оптимальних параметрів обробки чавуну з використанням аналізу відгуків поверхонь (RSM) [15].

Chen і Li (2017) запропонували підхід оптимізації режимів різання на основі симплекс-методу лінійного програмування, що дозволяє ефективно врахувати численні технічні обмеження [16].

Patel і Dhar (2017) у своєму дослідженні використовували методи Taguchi та аналіз варіацій для визначення впливу параметрів різання на шорсткість поверхні при обробці чавуну [17].

Singh et al. (2019) розглядали застосування машинного навчання для прогнозування оптимальних параметрів фрезерування чавунних деталей [18].

Крім того, Kumar та Chauhan (2015) відзначили ефективність застосування генетичних алгоритмів для глобальної оптимізації режимів різання при обробці складних поверхонь із чавуну [19].

Wang і Xu (2020) запропонували застосування методів мультиоб'єктивної оптимізації (МОО) для одночасного врахування мінімізації енергоспоживання та підвищення якості обробки [20].

Автори вказаних джерел провели комплексні дослідження з оптимізації режимів різання для фрезерних верстатів з ЧПК. Вони запропонували різні методи, включаючи аналітичні моделі, експериментальні дослідження та математичне програмування. Усі ці підходи спрямовані на мінімізацію собівартості обробки, підвищення продуктивності та забезпечення необхідної якості поверхні. Особливу увагу приділено застосуванню симплекс-методу для вирішення задач лінійного програмування.

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить про актуальність застосування математичних моделей оптимізації для фрезерної обробки деталей із чавуну.

4.2 Оптимізація режимів різання при фрезеруванні

Способи знаходження оптимальних режимів різання.

1. Аналітичні методи

Аналітичні методи базуються на використанні теоретичних формул та математичних моделей для розрахунку параметрів різання. Ці методи враховують фізичні та механічні властивості матеріалу, геометрію інструменту та умови обробки.

Опис методу:

Аналітичні розрахунки проводяться за допомогою формул, що описують процес різання. Наприклад, формули для розрахунку сили різання, потужності верстата, температури різання тощо.

$F_c = C_F \cdot S^{x_F} \cdot t^{y_F} \cdot V^{z_F}$ – сила різання,

$P = F_c \cdot V / 60$ – потужність різання [21].

Переваги:

- Висока точність при достатньому обсягу вхідних даних.
- Можливість швидко перерахувати параметри для різних умов обробки.

Недоліки:

- Складність врахування всіх факторів (наприклад, знос інструменту або неоднорідність матеріалу).
- Необхідність наявності великої кількості емпіричних коефіцієнтів.

2. Експериментальні методи

Експериментальні методи передбачають проведення практичних досліджень на верстаті для визначення оптимальних режимів різання.

Опис методу:

Експерименти проводяться за допомогою спеціального обладнання, яке фіксує параметри процесу різання (температуру, силу різання, шорсткість

поверхні тощо). На основі отриманих даних будуються графіки або таблиці, які вказують на оптимальні значення параметрів [22].

Приклад:

Проведення серії тестів з різними значеннями швидкості різання (V) та подачі (S).

Вимірювання зносу інструменту, якості поверхні та продуктивності обробки.

Переваги:

- Реальні дані, які враховують всі фактори процесу різання.
- Можливість адаптації до конкретного обладнання та матеріалу.

Недоліки:

- Великі часові та фінансові затрати.
- Обмеженість результатів лише для конкретних умов експерименту.

3. Методи математичного програмування

Математичне програмування – це набір методів, які дозволяють знаходити оптимальні режими різання за допомогою математичних моделей та алгоритмів. Найчастіше використовується симплекс-метод, який дозволяє знайти оптимальне рішення в області, обмеженій системою лінійних нерівностей.

Опис методу:

Методи математичного програмування включають лінійне програмування, нелінійне програмування та інші підходи. Найчастіше використовується симплекс-метод, який дозволяє знайти оптимальне рішення в області, обмеженій системою лінійних нерівностей [23].

Приклад:

Побудова системи обмежень:

За потужністю верстата: $P \leq P_{\max}$.

За стійкістю інструменту: $T \geq T_{\min}$.

За жорсткістю: $F \leq F_{\max}$.

Цільова функція: мінімізація собівартості обробки $C = a \cdot S + b \cdot n + c$.

Переваги:

- Можливість врахування багатьох обмежень одночасно.
- Універсальність методу для різних задач оптимізації.

Недоліки:

- Складність побудови математичної моделі.
- Необхідність використання спеціалізованих програм для розрахунків.

4. Графічний метод

Графічний метод є одним із найпростіших способів знаходження оптимальних режимів різання. Він полягає у побудові графіка з областю допустимих рішень та визначенні точки, що мінімізує цільову функцію.

Опис методу:

На графіку одна вісь відповідає подачі (S), а інша – швидкості обертання шпинделя (n). Побудова кривих, що відповідають обмеженням. Знаходження точки перетину ліній, яка задовольняє всі обмеження та мінімізує або максимізує цільову функцію [23].

Приклад:

Область допустимих рішень обмежена кривими:

$$P \leq P_{\max}.$$

$$R_a \leq R_{a,\max}.$$

$$n_{\min} \leq n \leq n_{\max}.$$

Переваги:

- Простота та наочність.
- Можливість швидко оцінити вплив кожного обмеження.

Недоліки:

- Обмеженість двома змінними (подача та швидкість).
- Неможливість застосування для складних систем з багатьма змінними.

5. Комбіновані методи

Комбіновані методи поєднують аналітичні, експериментальні та математичні підходи для досягнення найкращих результатів.

Опис методу:

Початкові параметри розраховуються аналітично. Експерименти проводяться для перевірки теоретичних результатів. Отримані дані використовуються для коригування математичної моделі [22].

Приклад:

Розрахунок початкових значень швидкості різання та подачі за допомогою аналітичних формул. Проведення експериментів для визначення фактичного зносу інструменту та якості поверхні. Коригування моделі за допомогою методів математичного програмування.

Переваги:

- Висока точність та надійність результатів.
- Можливість адаптації до реальних умов.

Недоліки:

- Значні часові та фінансові затрати.
- Складність реалізації.

Таким чином, кожен із способів знаходження оптимальних режимів різання має свої переваги та недоліки. Вибір методу залежить від конкретних умов задачі, доступних ресурсів та необхідної точності результатів. Для задачі оптимізації режимів різання на фрезерному верстаті з ЧПК найбільш ефективним є комбінований підхід, який поєднує аналітичні розрахунки, експериментальні дані та методи математичного програмування.

Математична модель.

Метод математичного моделювання в контексті оптимізації режимів різання включає створення математичних моделей, які описують процеси різання металу на верстатах з ЧПК. Ці моделі можуть включати рівняння, що описують взаємодію інструменту і заготовлі, а також вплив різних параметрів, таких як швидкість різання, подача і глибина різання.

При математичному моделюванні є можливість використовувати існуючі емпіричні формули. Вони достатньою мірою відображають залежність змінних, що впливають на процес різання. Для створення математичної моделі фрезерування достатньо мати: критерії оптимізації; цільову функцію; систему обмежень; систему рівнянь, що описують об'єкт; вхідні, вихідні та внутрішні параметри.

Одним із найпоширеніших методів оптимізації в даний час є метод лінійного програмування. Він дозволяє здійснювати одночасну оптимізацію швидкості різання і подачі з урахуванням обмежень, що діють при різанні. Обов'язковою умовою використання цього методу є можливість лінеаризації цільової функції та обмежень [24, 25].

Вихідні дані.

Операція 005 – Вертикально-фрезерна

Фрезерування поверхні шириною 410 мм, довжина заготовки 586 мм, шорсткість торців заготовки $Ra = 1,6$ мкм

Обладнання – Фрезерний верстат HAAS VF-4

Різальний інструмент – фреза Sandvik CoroMill® 345 Ø125 мм, 6 пластин, GC1030 (345-125Q50-12M)

Технічні обмеження:

1) Обмеження за потужністю приводу головного руху верстата

$$n^{1-w} \cdot S_z^y \leq \frac{1020 \cdot 60 \cdot 10^3 \cdot N_B \cdot \eta}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot D^{1-q} \cdot \pi \cdot z \cdot K_{mp}} \quad (4.1)$$

2) Обмеження за стійкістю інструмента

$$n \cdot S_z^y \leq \frac{1000 \cdot C_v \cdot D^{1-q} \cdot K_v}{T^m \cdot t^x \cdot B^u \cdot \pi \cdot z^p} \quad (4.2)$$

3) Обмеження за жорсткістю інструмента

$$n^w \cdot S_z^y \leq \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot f \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot L_{B\Phi}^3 \cdot K_{mp} \cdot K} \quad (4.3)$$

4) Обмеження за точністю обробки

$$n^{-w} \cdot S_z^y \leq \frac{T_H \cdot D^q}{10 \cdot C_{pz} \cdot t^x \cdot B^n \cdot z \cdot K_{mp} \cdot \omega \cdot K} \quad (4.4)$$

5) Обмеження за шорсткістю обробленої поверхні

$$S_z \leq 2,82 \cdot r^{0,5} \cdot R_z^{0,5} \quad (4.5)$$

6) Обмеження за мінімальними обертами шпинделя

$$n \geq n_{min} \quad (4.6)$$

7) Обмеження за максимальними обертами шпинделя

$$n \leq n_{max} \quad (4.7)$$

8) Обмеження за мінімальною подачею

$$S_z \geq S_{z \min} \quad (4.8)$$

9) Обмеження за максимальною подачею

$$S_z \leq S_{z \max} \quad (4.9)$$

Як цільову функцію прийнято собівартість операції F , яка виражається через режими обробки:

$$F = \frac{C}{S_0 \cdot n},$$

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

Математична модель оптимального режиму різання містить систему технічних обмежень, виражених у вигляді лінійних нерівностей, та лінійне рівняння цільової функції. В нашому випадку система обмежень для фрезерної обробки разом з цільовою функцією:

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Для проведення математичних обчислень використовуємо пакет MathCad, в якому створюємо програму з блоком рішення для знаходження оптимальних величин n та S . Програма в MathCad та величини коефіцієнтів в технічних обмеженнях приведені в Додатках цієї роботи.

Після спрощень та заміни $y = \ln(n)$, $x = \ln(S_Z)$ систему (4.10) перепишемо у вигляді:

$$\left. \begin{aligned}
 y + 0,74 \cdot x &\leq 12,37 \\
 0,74 \cdot x &\leq 13,12 \\
 y + 0,74 \cdot x &\leq 5,07 \\
 0,74 \cdot x &\leq 8,3 \\
 x &\leq 3,23 \\
 y &\geq 2,3 \\
 y &\leq 9 \\
 x &\geq -4,61 \\
 x &\leq -1,2 \\
 F = y + x &\rightarrow \max
 \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

Оптимальні значення частоти обертання шпинделю та подачі, які були визначені за допомогою програми MathCad, складають:

$$n = 386,22 \text{ об/хв.},$$

$$S_z = 0,3 \text{ мм/зуб.}$$

Також визначити оптимальні режимів обробки за моделлю (4.10-4.11) можливо графічним способом. 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 технічним обмеженням.

На рисунку 4.1 представлено отримані криві, на рисунку 4.2 – багатокутник рішень моделі (4.10-4.11).

Цифрами від 1 до 9 на графіках позначені криві технічних обмежень, фігура $AA_1A_3A_2$ – багатокутник рішень. Визначив координати точок A , A_1 , A_3 , A_2 , знайдемо точку, яка буде задовольняти умові $F = y + x \rightarrow \max$.

Координати точок:

$$A (-4,61; 8,48); A_1 (-1,2; 5,96), A_3 (-4,61; 2,3); A_2 (-1,2; 2,3).$$

Точка максимуму – A_1 . Оптимальні значення режиму різання:

$$n = e^{5,96} = 387,61 \text{ об/хв.},$$

$$S_z = e^{-1,2} = 0,3 \text{ мм/зуб.}$$

**Конфіденційну інформацію
та комерційну таємницю
вилучено з матеріалів на
підставі експертного
висновку від 30.06.2025р.**

Рисунок 3.1 – Графічне визначення оптимальних режимів різання з технічними обмеженнями: 1 – за потужністю приводу головного руху верстата, 2 – за стійкістю інструмента, 3 – за жорсткістю інструмента, 4 – за точністю обробки, 5 – за шорсткістю обробленої поверхні, 6 – за мінімальними обертами шпинделя, 7 – за максимальними обертами шпинделя, 8 – за мінімальною подачею, 9 – за максимальною подачею

Конфіденційну інформацію та комерційну таємницю вилучено з матеріалів на підставі експертного висновку від 30.06.2025р.

Рисунок 3.2 – Графічне визначення оптимальних режимів різання, заштрихована область – багатокутник рішень

Аналіз графіків та висновки:

Графік 4.1 (Технічні обмеження) :

- Кожне обмеження представлене як гранична пряма, яка визначає напівплощину дозволених значень.

- Найбільший вплив на обмеження режимів має обмеження за жорсткістю інструменту (крива 3). Це вказує на критичність вибору швидкості та подачі, щоб уникнути перевантаження інструменту.

- Обмеження за потужністю (крива 1) та обмеження за мінімальною/максимальною швидкістю (криві 6-7) також відіграють важливу роль у формуванні області допустимих рішень.

- Обмеження за шорсткістю поверхні (крива 5) впливає на точність обробки, але не є критичним у цьому випадку.

Графік 4.2 (Многокутник рішень) :

- Области допустимих рішень утворюють багатокутник, де кожна точка задовольняє всім обмеженням.

- Оптимальна точка A_1 (координати (-1,2; 5,96)) знаходиться на межі обмеження за жорсткістю (крива 3), що підтверджує її ключову роль.

- Результати графічного методу та програми MathCad збігаються, що свідчить про точність моделі.

Висновки:

1) Вплив обмежень: Найважливішим фактором, який визначає оптимальні режими, є жорсткість інструменту. Це обумовлено необхідністю запобігти зносу або зламу фрези.

2) Ефективність методів: Комбінований підхід (аналітичні розрахунки + математичне програмування) дозволяє знайти оптимальні параметри, які одночасно враховують всі обмеження.

3) Аналіз цільової функції: Максимізація $F = y + x$ (де $y = \ln(n)$, $x = \ln(S_z)$) показує, що найоптимальніші режими досягаються за рахунок збалансованого вибору швидкості та подачі, що мінімізує собівартість.

4) Переваги моделі: Математична модель MathCad дозволяє швидко та з достатньою точністю оцінювати можливі варіанти, що зменшує експериментальні витрати.

Доцільність використання отриманих оптимальних режимів різання для обробки чавуну на верстаті з ЧПК.

Отримані режими різання є доцільними для використання, але з певними застереженнями:

1. Режими враховують реальні технічні обмеження:

Оптимальні значення обертів шпинделя та подачі були отримані з урахуванням максимально допустимого навантаження на шпиндель, жорсткості інструменту, обмежень за якістю поверхні та іншими обмеженнями.

Особливо важливо, що ключове обмеження – жорсткість інструменту – було критичним при визначенні області допустимих режимів. Це означає, що режими не приведуть до значних вібрацій або втрати точності обробки.

2. Баланс між швидкістю обробки та якістю:

Обрані режими забезпечують оптимальне співвідношення між продуктивністю (часом обробки) і якістю поверхні (шорсткістю $Ra = 1,6$ мкм). Це дуже важливо для корпусних деталей редукторів, які мають жорсткі вимоги до якості посадочних площин.

3. Підтвердження через два незалежних методи:

Збіг результатів графічного методу та розрахунків в Mathcad доводить, що математична модель коректно описує реальний процес різання. Це означає, що режими є не просто теоретичними, а практично обґрунтованими.

4. Особливості обробки чавуну:

Чавун добре обробляється при помірних швидкостях різання та помірних подачах через його крихкість і можливість утворення сколів на різальній кромці інструмента.

4.3 Висновки

В даному розділі проаналізовано методи математичного програмування, створено математичну модель для визначення оптимальних режимів різання при фрезеруванні деталі, проведено оцінку доцільності використання отриманих оптимальних режимів різання для обробки чавуну на верстаті з ЧПК.