

№ 20  
26.05.2025  
P.M.

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

Механіко-машинобудівний факультет  
Кафедра технологій машинобудування та матеріалознавства

## ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

кваліфікаційної роботи ступеня магістра

Здобувачу вищої освіти Сіроус Артем Юрійович  
(ПІБ)

академічної групи 131М-23Н-1 ММФ  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг  
машинобудівного виробництва»

на тему: «Дослідження і інтеграція спеціальних інженерних систем в  
розрахунок автоматизованої технології обробки деталі на верстаті з ЧПК»

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

Керівники	Прізвище, ініціали	Оцінка за шкалою		Підпис
		рейтинговою	інституційною	
кваліфікаційної роботи	Рубан В.М.	80	добре	P.M.
розділів:				
Аналітичний	Рубан В.М.	80	добре	P.M.
Технологічний	Рубан В.М.	80	добре	P.M.
Спеціальний	Рубан В.М.	80	добре	P.M.
Науково- дослідницький	Рубан В.М.			
Рецензент	Савченко О.В.	80	добре	С. Савченко

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.

P.M.

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

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**  
завідувач кафедри

технологій машинобудування та матеріалознавства  
(повна назва)

  
(підпис)

В.А. Дербаб  
(ініціали та прізвище)

« 15 » \_\_\_\_\_ 01 \_\_\_\_\_ 2025 року

## **ЗАВДАННЯ** на кваліфікаційну роботу ступеня магістра

здобувачу вищої освіти Сіроус Артем Юрійович  
(прізвище та ініціали)

академічної групи 131М-23Н-1 ММФ  
(шифр)

спеціальності 131 Прикладна механіка

спеціалізації за освітньо-науковою програмою «Наскрізний інжиніринг машинобудівного виробництва»

### **1 ПІДСТАВИ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБОТИ**

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

### **2 МЕТА ТА ВИХІДНІ ДАНІ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ РОБІТ**

Об'єкт досліджень – процес механічної обробки деталі типу «вал» у серійному виробництві на обладнанні з числовим програмним керуванням.

Предмет досліджень – технологічні стратегії обробки, вибір різального інструменту, параметри режимів різання та моделювання процесу у САМ-системах.

Мета – оптимізація технологічного процесу виготовлення деталі «вал» з використанням САД/САМ систем, вибір оптимальних режимів різання, розробка маршруту обробки, підбір устаткування та ріжучого інструменту.

Вихідні дані для проведення роботи – креслення деталі, матеріал заготовки (сталь 38ХА), параметри серійного виробництва (річна програма, тип верстатів), довідкові дані для розрахунку режимів різання, технічні характеристики обладнання та інструменту, вимоги до точності та шорсткості поверхонь, моделі в САД/САМ середовищі (SolidWorks, FeatureCAM).

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 7 с, \_\_\_ рис, \_\_\_ табл., 62 додаток, 60 джерела.

Тема: Дослідження і інтеграція спеціальних інженерних систем в розрахунок автоматизованої технології обробки деталі на верстаті з ЧПК. ТЕХНОЛОГІЯ, ДЕТАЛЬ, ОПЕРАЦІЯ, ФОРМОУТВОРЕННЯ, ОБЛАДНАННЯ З ЧПК, САД, САМ.

Поєднання токарно-фрезерних робіт на верстатах з ЧПК набуло значного поширення в сучасному машинобудуванні. Тому визначення оптимальної технології та траєкторій руху керованих агрегатів має актуальне значення при металообробці. Також актуальною є проблема застосування оптимізованих режимних параметрів при механічній обробці деталі, в спеціалізованих САМ-системах, при складанні технології виготовлення виробу.

Об'єкт дослідження у кваліфікаційній роботі – процеси формоутворення поверхонь у деталі машинобудівного призначення.

Предмет дослідження – стратегії програмного формоутворення поверхонь на обладнанні з ЧПК.

Метою кваліфікаційної роботи є порівняння оптимальних рухів формоутворення при обробці деталі на обладнанні з програмним керуванням при різних траєкторіях інструменту.

Методика досліджень – комп'ютерне моделювання операцій формоутворення на основі САМ-програми.

Результат роботи – експериментальні дані щодо режимних параметрів обробки поверхонь за різними стратегіями формоутворення. Визначена оптимальна стратегія формоутворення за умови врахування закладених при моделюванні початкових даних.

Наукова новизна кваліфікаційної роботи – визначення оптимальних режимних параметрів при точінні деталі вал на верстаті з ЧПК.

Практична цінність – рекомендації щодо застосування альтернативних технологічних методів виготовлення деталей на основі САМ-програм.

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».

## ЗМІСТ

Вступ.....	6
1 Аналітичний розділ .....	7
1.1 Характеристика об'єкта виробництва .....	7
1.2 Оцінка технологічності деталі .....	10
2 Технологічний розділ .....	13
2.1 Визначення типу виробництва і форма його організації .....	13
2.2 Вибір і обґрунтування способу отримання заготовки .....	14
2.3 Вибір технологічних баз деталі Вал .....	17
2.4 Розробка маршруту обробки деталей .....	17
2.5 Визначення припусків на обробку та розмірів заготовки .....	19
2.6 Вибір технологічного обладнання .....	19
2.7 Визначення режимів різання .....	23
2.8 Вибір різального інструменту за системою ISO 9001 .....	30
2.9 Автоматизований процес виготовлення деталі Вал .....	31
2.10 Створення моделі і симуляція обробки деталі .....	32
2.11 Вибір стратегій обробки і устаткування .....	33
2.12 Генерування керуючої програми для верстата з ЧПК .....	34
3 Спеціальний розділ .....	38
3.1 Вибір ріжучого і вимірювального інструмента для параметричних моделей в систему FeatureCAM. .....	38
4 Науково-дослідний розділ .....	46
4.1 Оптимізація режимних параметрів при токарній обробці.....	46
Висновки .....	58
Література .....	60
Додатки.....	

## ВСТУП

Значний ефект можливий від використання сучасного універсального інструменту і інструментальних матеріалів, що забезпечують високу швидкість різання і стійкість, що скорочує машинний час на обробку і час простою верстата в налагодженні.

Зберігається тенденція, коли в ціні виробу значна частина становить вартість матеріалу та енергії. Однак, зниження частки механічної обробки, дозволяє відчутно знизити технологічну собівартість виробів, якщо використовувати заготовки з високим ступенем готовності та обладнання з широкими технологічними можливостями.

При проектуванні технологічних процесів механічної обробки в сучасних умовах на перше місце виступають питання оптимізації багатьох, часто суперечливих факторів. Обсяг виробництва виробів повинен строго відповідати потребам ринку. Робота «на склад» руйнівна, тому структура технологічного процесу в цілому і кожної операції окремо, а також організація виробництва, повинні забезпечувати оптимальну продуктивність високу гнучкість виробництва.

Виходячи з цього, при проектуванні нових цехів необхідно забезпечити оптимальне співвідношення наявних універсальних верстатів напівавтоматів і верстатів з ЧПУ, що оснащуються переналагоджуваної оснащенням. Економічно обґрунтоване завантаження устаткування повинна забезпечуватися відповідною організацією виробничого процесу в цеху, заснованої на прогнозуванні та оперативному управлінні з використанням обчислювальної техніки, що дозволяє скоротити час на технологічну підготовку і простої верстатів у налагодженні.

# 1. АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

## 1.1 Характеристика об'єкта виробництва

### 1.1.1. Аналіз матеріалу і технологічності деталі

Основними вихідними даними для технологічного проектування є конструкторські документи у вигляді робочих креслень. Основний конструкторський документ деталі «Вал» виконаний на форматі А1,

Документ дає повну інформацію про матеріали деталей і їх механічні властивості, термообробці, форму, розміри і точності розташування поверхонь. Графічна та текстова інформація представлена відповідно до вимог ЕСКД.

Для розробки оптимального технологічного процесу виготовлення деталі, забезпечення раціональної концентрації технологічних операцій із застосуванням економічно обґрунтованих і технологічно необхідних методів обробки, необхідно проаналізувати призначення робочих поверхонь деталі, використовувані матеріали і технічні вимоги до них, з точки зору умов збирання та експлуатації.

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

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

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

<i>Поковки. Загартування в масло з 850 ° C + відпустку при 560 ° C, охолодження на повітрі</i>						
100	≥540	≥690	≥15	≥45	≥590	240-280
100-200	≥490	≥660	≥13	≥40	≥540	230-270
200-300	≥440	≥640	≥14	≥40	≥540	230-260

*Механічні властивості з конструкційної високоякісної сталі 38ХА*

Стан поставки	Перетин (мм)	$\sigma_B$ , МПа	$\Psi$ (%)	НВ
Сталь гарячекатана і гарячекатана зі спеціальною обробкою поверхні				
Термооброблена	Зразок			$\leq 187$
<i>Сталь калібрована і калібрований зі спеціальною обробкою поверхні</i>				
Нагартована (без т/о)	Зразок			$\leq 207$
Після відпалу (відпустки)	Зразок	$\leq 590$	$\geq 60$	$\leq 207$
Після сфероїдезуючого відпалу	Зразок	$\leq 560$	$\geq 60$	$\leq 207$

Механічні властивості сталі 38ХА в залежності від температури відпустки

t отпуски (°C)	$\sigma_T / \sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_5$ , %	$\Psi$ (%)	НВ
Сортовий прокат. Закалка в воду с 850 °C + Відпуск					
400	$\geq 1220$	$\geq 1310$	$\geq 7$	$\geq 38$	$\geq 380$
500	$\geq 930$	$\geq 1030$	$\geq 12$	$\geq 47$	$\geq 320$
600	$\geq 710$	$\geq 830$	$\geq 17$	$\geq 63$	$\geq 260$

Механічні властивості сталі 38ХА в залежності від температури випробування

t отпуски (°C)	$\sigma_T / \sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_5$ , %	$\Psi$ (%)	НВ
Пруток діаметром 25 мм. Загартування в масло з 860 °C + Відпустка при 550 °C					
-20	$\geq 900$	$\geq 1040$	$\geq 18$	$\geq 58$	
-40	$\geq 930$	$\geq 1100$	$\geq 18$	$\geq 55$	
-70	$\geq 1000$	$\geq 1120$	$\geq 18$	$\geq 55$	
Пруток діаметром 28-55 мм. Загартування в масло з 830 °C + Відпустка при 680 °C (витримка 3 ч)					
20	$\geq 570$	$\geq 700$			207-217
400	$\geq 430$	$\geq 590$			
500	$\geq 360$	$\geq 420$			
600	$\geq 210$	$\geq 245$			
Пруток діаметром 28-55 мм. Загартування в масло з 850 °C + Відпустка при 550 °C (витримка 3 ч)					
20	$\geq 790$	$\geq 940$	$\geq 13$	$\geq 55$	285-302
300	$\geq 680$	$\geq 880$	$\geq 17$	$\geq 58$	
400	$\geq 610$	$\geq 690$	$\geq 18$	$\geq 68$	
500	$\geq 430$	$\geq 490$	$\geq 21$	$\geq 80$	

*Межа витривалості високоякісної хромової конструкційної сталі 38ХА*

Термообробка, стан стали	$\sigma_{-1}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа
Загартування + відпустку	333	690	
НВ 241	392	980	830

### 1.1.2 Оцінка технологічності деталі

Вал - деталь машини, призначена для передачі крутного моменту і сприйняття діючих сил з боку розташованих на ньому деталей і опор. Маса деталі 0,306 кг.

Показники якісної оцінки технологічності деталі Вал наведені в таблиці 1.3

Таблиця 1.3. Результати аналізу технологічності конструкції деталі Вал.

Показники технологічності конструкції деталі	Оцінка технологічності	
	Добре (допустимо)	Погано (недопустимо)
Наявність в деталі стандартних і уніфікованих елементів.	+	-
Можливість виготовлення деталі зі стандартних і уніфікованих заготовок.	+	-
Наявність оптимальної точності і шорсткості поверхні стали.	+	-
Відповідність фізико-хімічних і механічних властивостей матеріалу, жорсткості форми і розмірів деталі вимога технології механічної і термічної обробки.	+	-
Відповідність показників базових поверхонь деталі (розміри, точність, шорсткість) вимогам установці обробки і контролю.	+	-
Відповідність оформлення робочого креслення деталі вимогам КД	+	-

Вимоги до робочих поверхонь (рис.1.2) деталі не є завищеними і відповідають їхньому службовому призначенням. Застосований матеріал забезпечує виконання вимог до механічних властивостей поверхонь і деталі в цілому і має гарні технологічними характеристиками як при обробці тиском, так і різанням.

В цілому, технологічність конструкції деталі Вал після якісного аналізу можна оцінити як гарну за основними показниками.

Крім якісних показників є ще й кількісні. Необхідно визначити показники технологічності конструкції валу.

Дані конструктивного аналізу деталі по поверхнях представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4. Конструктивний аналіз деталі

Найменування поверхні	Кількість поверхонь	Кількість уніфікованих елементів	Квалітет точності	Параметр шорсткості, мкм
торець Л	1	-	14	2,5
торець П	1	-	14	2,5
Отвір для гвинта M12x1,5-h6	2	2	14	5
поверхня Ø12	1	1	6	2,5
шпонковий паз	1	1	9	5
Циліндрична поверхня Ø20	1	1	6	0,63
Циліндрична поверхня Ø19	1	1	14	10
Циліндрична поверхня Ø20	1	1	7	0,63
Циліндрична поверхня Ø26	1	1	14	5
Циліндрична поверхня Ø20	1	1	9	0,16
поверхня Ø15	1	1	14	2,5
евольвента Ев18x1x18	1	-	11	2,5
Фаска 1 × 45 про	7	7	14	5
Фаска 0,5 × 45 про	2	2	14	5
Ітого:	Q <sub>з</sub> = 22	Q <sub>у</sub> = 19	-	-

Визначимо коефіцієнт уніфікації конструктивних елементів:

$$K_{yc} = \frac{Q_y}{Q_z} \quad (1.1)$$

де  $Q_y$  – кількість уніфікованих елементів;

$Q_z$  – загальна кількість поверхонь.

$$K_{yc} = \frac{19}{22} = 0,86$$

Так як  $K_{yc} > 0,6$ , можна зробити висновок, що деталь технологічна.

Визначимо коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_{\text{и.м.}} = \frac{M_{\text{д}}}{M_{\text{з}}} \quad (1.2)$$

$$K_{\text{и.м.}} = \frac{0,306}{0,780} = 0,41$$

Для вихідної заготовки цього типу такий показник свідчить про задовільний використанні матеріалу.

Аналізуючи вимоги робочого креслення, робимо висновок, що матеріал деталі дозволяє забезпечити необхідні механічні властивості, шорсткість необроблювальних поверхонь та конструктивні особливості деталі.

Для контролю або вимірювання розмірів оброблюваних поверхонь і їх взаємного розташування не потрібні спеціальні інструменти або пристосування.

Таким чином, технологічність конструкції деталі «Вал» після якісного і кількісного аналізу можна оцінити як гарну за всіма показниками.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

### 2.1. Визначення типу виробництва і форми його організації

Серійне виробництво характеризується обмеженою номенклатурою виробів, виготовлених або ремонтуються періодично повторюваними партіями і порівняно великим обсягом випуску. Серійне виробництво є основним типом сучасного машинобудівного виробництва і підприємствами цього типу випускається 75-80% всієї продукції машинобудівного виробництва. По всіх технологічних і виробничих характеристиках серійне виробництво займає проміжне положення між одиничним і масовим виробництвом. Обсяг випуску підприємств серійного виробництва коливається від десятків і сотень до тисяч регулярно повторюваних виробів, використовується універсальне, спеціалізоване і частково спеціальне обладнання. Широко використовуються верстати з ЧПУ, обробні центри. Устаткування розставляються по технологічним групам з урахуванням напрямку основних вантажних потоків цеху з предметно-замкнутим ділянкам. Технологічне оснащення в основному універсальна і створюється високопродуктивна спеціальне оснащення, при цьому доцільність її створення повинна бути попередньо обґрунтована техніко-економічними розрахунками.

В якості вихідних заготовок застосовують гарячекатаний та холоднотягнутий прокат, лиття в землю і під тиском, точне лиття, поковки, штампування. Необхідна точність досягається як методом автоматичного отримання розмірами, так і методом пробних ходів і промірів з частковим застосуванням розмітки.

Середня кваліфікація робітників - 3-5 розряд. Поряд з робітниками високої кваліфікації, які працюють на складних верстатах і наладчиків,

використовуються робочі оператори, що працюють на настроєних верстатах.

Виробнича програма випуску деталей встановлюється в залежності від річної потреби виробів і організаційно-технічних умов виробництва та збирання. За завданням приймається серійний тип виробництва. Вважаючи, що річна потреба у виробах з 50000 штук.

Розмір партії деталей, одночасно що запускаються у виробництво, визначаємо за формулою:

$$N_c = \frac{Na}{\Phi} \quad \text{шт}; \quad (2.1)$$

де  $N$  – річна програма випуску деталей, шт;

$\Phi$  - дійсний річний фонд часу роботи в годинах;

$a$  – періодичність запуску деталей у виробництво або число днів, на яке необхідно забезпечити роботу складального цеху,  $a=3,6,12,24$  дня.

Визначимо розмір партії для деталі вал:

$$N_c = \frac{25000*6}{254} = 590,55 \approx 591 \quad \text{шт.}$$

Для деталі корпус:

$$N_c = \frac{25000*6}{254} = 590,55 \approx 591 \quad \text{шт.}$$

Такт випуску деталей у виробництво визначається за формулою:

$$T_B = \frac{60F_g m}{N}, \text{ мин} \quad (2.2)$$

де  $F_g$  – річний дійсний фонд роботи верстата, год; при роботі в одну зміну  
 $F_d \cdot m = 2030$  ч;

$m$  – число змін роботи верстата на добу;

$N$  – річна програма випуску деталей, шт.

Визначимо такт випуску для деталі вал:

$$T_B = \frac{60F_g m}{N} = \frac{60*2030}{25000} = 4,87 \quad \text{мин}$$

Для деталі корпус:

$$T_B = \frac{60F_g m}{N} = \frac{60*2030}{25000} = 4,87 \quad \text{хв}$$

Визначимо середнє основне технологічне час для декількох операцій обробки деталі вал:

Таблиця 2.1 Відомість виконання основних операцій обробки деталі вал:

Номер з/п	Найменування операцій	Зміст операцій
005	Заготівельна	заготівельна
010	Фрезерно-центрувальна	Підрізати торці. Зацентрувати.
015	Токарська	Точіння поверхонь за один прохід
020	Токарська	Точіння поверхонь за один прохід
025	Фрезерна	Фрезерувати шпонкові паз
030	Зубодовбальний	Довбати шліци
035	Шліфування	Шліфування під хром
040	Термічна	Хромування
045	Шліфування	Шліфувати поверхні
050	Полірування	Полірування $\varnothing 20e9$
055	Слюсарна	Слюсарна
060	Контрольна	Контрольна

Середній штучний час за операціями визначимо за формулою:

$$T_{\text{шт.ср.}} = \frac{T_{\text{о.ср.}}}{K}, \text{ хв} \quad (2.3)$$

где  $T_{\text{о.ср.}}$  – Середній основний технологічний час;

$K$  – коефіцієнт безперервності роботи верстатів.

Середнє основне технологічне час визначимо за спеціальними формулами для кожної операції:

Підрізання торців:

$$T_{\text{о.ср.}} = 0,037 * 10^{-3} * (d_1^2 - d_2^2), \text{ хв} \quad (2.4)$$

$$T_{\text{о.ср.}} = 0,037 * 10^{-3} * (28^2 - 26^2) = 0,03 \text{ хв}$$

Точіння:

$$T_{\text{о.ср.}} = 0,17 * 10^{-3} * d * l, \text{ хв} \quad (2.5)$$

$$T_{\text{о.ср.}} = 0,17 * 10^{-3} * 12 * 31 = 0,063 \text{ хв}$$

$$T_{\text{о.ср.}} = 0,17 * 10^{-3} * 20 * 20 = 0,068 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 19 * 33 = 0,11 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 20 * 17 = 0,058 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 26 * 2,5 = 0,011 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 20 * 23,5 = 0,08 \text{ хв}$$

$$T_{o.c.p.} = 0,17 * 10^{-3} * 19,5 * 21 = 0,07 \text{ хв}$$

Загальний час на токарні операції:  $T_{o.c.p.} = 0,46 \text{ хв}$

Фрезування:

$$T_{o.c.p.} = 6 * 10^{-3} * l * n, \text{ хв} \quad (2.6)$$

$$T_{o.c.p.} = 6 * 10^{-3} * 20,5 * 2,5 = 0,31 \text{ хв}$$

Визначимо середнє поштучна час за операціями:

Підрізання торців:

$$T_{шт.ср} = \frac{0,03}{0,5} = 0,06 \text{ хв}$$

Точіння:

$$T_{шт.ср} = \frac{0,46}{0,5} = 0,92 \text{ хв}$$

Фрезування

$$T_{шт.ср} = \frac{0,31}{0,65} = 0,48 \text{ хв}$$

Середнє штучне час за операціями:  $T_{шт.ср} = 0,49$

Визначимо коефіцієнт серійності:

$$K_c = \frac{T_B}{T_{шт.ср}} \quad (2.7)$$

$$K_c = \frac{4,87}{0,49} = 9,94$$

коефіцієнт серійності  $K_c = 9,94$  відповідає серійному виробництву.

## 2.2. Вибір і обґрунтування способу отримання заготовок

Для раціонального вибору заготовки необхідно одночасно враховувати призначення і конструкцію деталі, технологічні вимоги, масштаб і серійність випуску, а також економічність виготовлення. Вибрати заготовку - значить встановити спосіб її отримання, призначити припуски на обробку кожної поверхні, розрахувати розміри і вказати вимоги до точності виготовлення.

З метою забезпечення найбільш оптимальних експлуатаційних властивостей деталі Вал приймаємо в якості заготовки гарячекатану поковки.

## 2.3. Вибір технологічних баз деталей вал

Базування - надання заготівлі відповідного положення в системі координат металорізального верстата, необхідного для виконання заданої частини технологічного процесу (операції).

Для обробки деталей на верстаті, деталь необхідно закріпити попередньо прийнявши базу. База - поверхня або поєднання поверхонь, вісь, точка, що належить заготівлі і використовується для базування. Від правильності базування залежить точність обробки.

При виборі баз необхідно керуватися такими міркуваннями: деталь повинна зручно встановлюватися на верстаті, базові поверхні повинні мати достатню довжину для забезпечення стійкого положення деталі при обробці, деталь повинна піддаватися найменшим деформаціям під дією сил різання, затиску і власної ваги, і т.д.

Відповідно до правил вибору баз, для обробки деталі вал на операціях в якості бази приймаємо зовнішню поверхню і торець заготовки.

## 2.4. Розробка маршруту обробки деталі

При розробці маршруту виготовлення деталі орієнтуємося на вигляд застосовуваної заготовки та її точність. Кількість технологічних операцій, їх

концентрація буде визначатися методами обробки поверхонь, які призначені виходячи з необхідного квалітету, розміру і параметра шорсткості.

Перелік оброблюваних поверхонь і методи обробки деталі вал наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. Технологічний маршрут обробки валу

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

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

## 2.5. Визначення припусків на обробку та розмірів заготовки валу

Так як в якості заготовки був обраний прокат, то можна розрахувати довжину прутка з урахуванням припусків, а також діаметр. Розраховані дані наведемо в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3. Припуски на заготовку валу

Розмір, мм	Шорсткість, Ra	Припуск 2 Z <sub>0</sub> , мм	Допуск, мм
Довжина 162	10	162+1,6=163,6	163,6 <sub>-0,4</sub>
Ø 26	5	26+2=28	28 <sub>-1</sub>

## 2.6. Вибір технологічного обладнання для деталі вал

Для фрезерно-центрувальної (010) і фрезерної (025) операції вибираємо токарно-фрезерний обробний центр моделі PUMA TL LYNX210 (рис.2.1). Цей інструментальний широкоуніверсальний верстат підвищеної точності призначений для горизонтального фрезерування виробів циліндричними, дисковими, фасонними та іншими фрезами, так і вертикального фрезерування торцевими, кінцевими, шпонковими і іншими фрезами під різними кутами.



Рис.2.1 Токарно-фрезерний обробний центр моделі PUMA TL LYNX210

Технічні характеристики верстата наведені в таблиці 2.4

<b>Модель</b>	<b>PUMA LYNX</b>
<b>Параметри обробки</b>	
Максимальна довжина точіння	545 мм
Максимальний діаметр точіння	481 мм
Діаметр патрону	210 мм
<b>Напрямні</b>	
Кількість вісей	2
Швидкість переміщення по вісі X	30 м/хв
Швидкість переміщення по вісі Z	30 м/хв
<b>Головний шпіндель</b>	
Швидкість шпінделю	14500 об/хв
Потужність двигуна	18.5 кВт
Крутний момент	183 Н*м
<b>Револьвер</b>	
Позицій інструменту	12
<b>Інші параметри</b>	
Система ЧПУ	Fanuc
<b>Габарити</b>	
Довжина	3415 мм
Висота	1900 мм
Глибина	1863 мм
Вага	4850 кг

Для виконання токарних операцій 015 і 020 деталі вал також вибираємо обробний центр PUMA TL LYNX210.

Для виконання зубодовбальної операції (030) деталі вибираємо верстат PUMA TL LYNX210, так як у нього є спеціальні функції фрезерування модульними фрезами та довбляком. Цей верстат призначений для зовнішнього та внутрішнього довбання плоских і фасонних поверхонь, вирізів і канавок, а також для довбання з піднутрінням до 10 град для інструментальних і ремонтних служб.

Для виконання шліфувальних операцій вибираємо круглошліфувальний верстат з ЧПУ моделі E-Tech EGP CNC (рис.2.2). Верстат призначений для зовнішнього, внутрішнього і торцевого шліфування циліндричних, конічних і плоских поверхонь в центрах або в патроні.



Рис.2.2 Шліфувальний верстат з ЧПУ моделі E-Tech EGP CNC

Технічні характеристики верстата наведені в таблиці:

Таблиця 2.7. Технічні характеристики верстата E-Tech EGP CNC

Найбільші розміри встановлюваного виробу, мм:	
при зовнішньому шліфуванні	

діаметр	280
довжина	1400
при внутрішньому шліфуванні	
діаметр	100
Діаметр виробу шліфується в закриті люнеті, мм:	
найбільший	100
найменший	20
Діаметр виробу, шліфується у відкритому люнеті, мм:	
найбільший	60
найменший	8
Найбільша довжина шліфування, мм:	
зовнішнього	1250
внутрішнього	100
Найбільше поздовжнє переміщення столу, мм:	1290
Швидкість гідравлічного переміщення стола з безступінчастим регулюванням, мм / хв:	
найбільша	6000
найменша	100
Найбільший кут повороту верхнього столу, град	
За годинниковою стрілкою	-2
Проти годинникової стрілки	7
Діаметр шліфувального круга	
найбільший	350
найменший	260
Число оборотів шпинделя шліфувальної бабки в хв.	1880/2110

Електродвигун приводу шліфувального круга:	
Число обертів в хв.	2450
Потужність, кВт	8
Габарити верстата	4990X2000X1650
вага, кг	4600

Для виконання полірувальної операції вибираємо теж верстат шліфувально - полірувальний E-Tech EGP CNC. Верстат призначений для шліфування та полірування вільним абразивом плоских і сферичних поверхонь заготовок оптичних деталей або блоків методом притирання із застосуванням вільного абразиву.

Для програмно-комбінованих операцій вибираємо верстат моделі DS Solution PUMA TL LYNX210. Токарний напівавтоматичний револьверний верстат призначений для обробки деталей типу тіл обертання зі сталі, чавуну і кольорових металів для дрібносерійного і серійного виробництва. Верстат обробляє деталі типу «фланець», що складається з окремих елементів і прут з максимальним діаметром 63 мм і 100 мм. Можлива обробка зовнішньої і внутрішньої поверхонь циліндричних, конічних і сферичних форм деталей. А також свердління, зенкування і нарізування різьблення.

## 2.7. Визначення режимів різання для обробки валу

- 1) Розрахунок режимів різання будемо виробляти для токарної операції 015.
- 2) Устаткування - токарний верстат моделі 1А64.
- 3) Застосовуємо різець з пластинами з твердого сплаву Т5К10 з розміром державки різця 25 × 20 мм.
- 4) Точити поверхню Ø12. Припуск  $h = 16$  мм, довжина 10 мм.

- 5) Режими різання визначимо аналітичним методом.
- 7) Чернове точіння.  $h = 10$  мм. Припуск знімаємо за один прохід:  $t = 10$  мм
- 8) Чистове точіння.  $h = 6$  мм. Припуск знімаємо за один прохід:  $t = 6$  мм. Визначимо режими різання при чорновій обробці поверхні.

$$S_o = S_{o_T} * K_{S_{\Pi}} * K_{S_{И}} * K_{S_{Ж}} * K_{S_M} \quad (2.8)$$

де  $S_{o_T} = 0,4$  мм/об – подача обрана залежно від глибини різання.

$K_{S_{\Pi}} = 0,9$  - коефіцієнт в залежності стану поверхні (з коркою);

$K_{S_{И}} = 0,65$  - коефіцієнт в залежності від матеріалу інструменту (Т5К10);

$K_{S_{Ж}} = 0,62$  - в залежності від найбільшого діаметра оброблюваної поверхні;

$K_{S_M} = 1,07$  коефіцієнт в залежності від оброблюваного матеріалу (Сталь 38ХА).

$$S_o = 0,4 * 0,9 * 0,65 * 0,62 * 1,07 = 0,16 \text{ мм/об}$$

За паспортними даними верстата приймаємо подачу рівну  $S_o = 0,16$  мм/об

$$V = V_T * K_{v_{И}} * K_{v_{\Phi}} * K_{v_{\Pi}} * K_{v_0}, \text{ м/хв} \quad (2.9)$$

де  $v_T = 250$  м/хв - швидкість різання при точінні стали 38ХА;

Поправочні коефіцієнти на швидкість різання при точінні легованої сталі:

$K_{v_{И}} = 1,0$  в залежності від матеріалу інструмента (Т5К10);

$K_{v_{\Phi}} = 0,9$  в залежності від головного угла в плані;

$K_{v_{\Pi}} = 0,85$  в залежності від стану поверхні (с коркой);

$K_{v_0} = 1,0$  в залежності від умов обробки (с СОЖ).

$$V = 250 * 1 * 0,9 * 0,85 * 1 = 191,25 \text{ м/хв}$$

За встановленої швидкості різання визначаємо частоту обертання шпинделя верстата.

$$\begin{aligned} \text{Частота обертів } n &= \frac{1000 * V}{\pi * D} \frac{\text{об}}{\text{хв}} \\ n &= \frac{1000 * 191,25}{3,14 * 12} = 5075,6 \text{ об/хв} \end{aligned} \quad (2.10)$$

Розрахункове значення  $n$  порівнюється з паспортними даними верстата. Для подальших розрахунків приймається найближче менше значення з ряду частот обертання шпинделя  $n = 5100$  (об/хв).

Основний технологічний час.

$$T_0 = \frac{L}{S \cdot n}, \text{ хв} \quad (2.11)$$

$$T_0 = \frac{10}{0,16 * 537,7} = 0,12$$

Сила різання.

$$P_z = 10 * C_p * t^x * S^y * V^n * K_p, \text{ Н} \quad (2.12)$$

де  $K_p$  – узагальнений поправочний коефіцієнт на умови різання.

$$K_p = K_{Mp} * K_{\varphi p} * K_{\gamma p} * K_{\lambda p} * K_{r p} \quad (2.13)$$

$$K_p = 0,75 * 0,94 * 1 * 1 * 0,93 = 0,66$$

$$P_z = 10 * 300 * 10 * 0,16^{0,75} * 191,25^{-0,15} * 0,66 = 2227,5 \text{ Н}$$

Потужність різання.

$$N_e = \frac{P_z * V}{1020 * 60}, \text{ кВт} \quad (2.14)$$

$$N_e = \frac{2227,5 * 191,25}{1020 * 60} = 6,96 \text{ кВт}$$

1. Визначимо режими різання при чистової обробки поверхні.

Визнач подачу:

$$S_o = 0,4 * 0,9 * 0,65 * 0,62 * 1,07 = 0,16 \text{ мм/об}$$

За паспортними даними верстата приймаємо подачу рівну  $S_o=0,16$

$$V = 250 * 1 * 0,9 * 0,85 * 1 = 191,25 \text{ м/хв}$$

За встановленої швидкості різання визначаємо частоту обертання шпинделя верстата.

$$\text{Частота обертів.} \quad n = \frac{1000 * V}{\pi * D} \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (2.10)$$

$$n = \frac{1000 * 191,25}{3,14 * 12} = 5075,6 \text{ об/хв}$$

Розрахункове значення  $n$  порівнюється з паспортними даними верстата. Для подальших розрахунків приймається найближче менше значення з ряду частот обертання шпинделя  $n = 5100$  (об / хв).

Основне технологічне час.

$$T_0 = \frac{L}{S \cdot n}, \text{ хв} \quad (2.11)$$

$$T_0 = \frac{10}{0,16 * 5100} = 0,012$$

Сила різання.

$$P_z = 10 * C_p * t^x * S^y * V^n * K_p, \text{ Н} \quad (2.12)$$

де  $K_p$  – узагальнений поправочний коефіцієнт на умови різання.

$$K_p = K_{Mp} * K_{\varphi p} * K_{\gamma p} * K_{\lambda p} * K_{rp} \quad (2.13)$$

$$K_p = 0,75 * 0,94 * 1 * 1 * 0,93 = 0,66$$

$$P_z = 10 * 300 * 10 * 0,16^{0,75} * 191,25^{-0,15} * 0,66 = 2227,5 \text{ Н}$$

Потужність різання.

$$N_e = \frac{P_z * V}{1020 * 60}, \text{ кВт} \quad (2.14)$$

$$N_e = \frac{2227,5 * 191,25}{1020 * 60} = 6,96 \text{ кВт}$$

Точити канавку  $\varnothing 9,8$ . Припуск  $h = 2,2$  мм, довжина 2 мм.

Режими різання визначимо аналітичним методом.

Визначаємо глибину різання за один прохід

$$t = \frac{D-d}{2}, \text{ мм} \quad (2.15)$$

де  $D$  – діаметр заготовки;

$d$  – діаметр деталі.

$$t = \frac{12 - 9,8}{2} = 1,1 \text{ мм}$$

Призначаємо подачу  $S=0,4$  мм/об

Визначаємо швидкість різання

$$V = v_{\text{табл.}} * K_1 * K_2 * K_3 \quad (2.16)$$

де  $v_{\text{табл.}}$  – табличне значення швидкості різання;

$$v_{\text{табл.}} = 170 \text{ м/с}$$

$$K_1 = 0,8$$

$$K_2 = 1,55$$

$$K_3 = 1$$

Підставивши значення в формулу, отримаємо

$$V = 170 * 0,8 * 1,55 * 1 = 210,8 \text{ м/с}$$

Визначаємо частоту обертання шпинделя за формулою 2.10

$$n = \frac{1000 * 210,8}{3,14 * 9,8} = 6850 \text{ об/хв}$$

Коригуємо частоту обертання шпинделя за паспортними даними верстата  $n=6850$  об/хв

Визначаємо потужність, затрачену на різання

$$N_{\text{рез}} = \frac{P_z * V_d}{1020 * 60}$$

Визначаємо силу різання  $P_z$

$$P_z = P_{z.\text{табл}} * K_1 * K_2 \quad (2.17)$$

где  $P_{z.\text{табл}}$  – табличное значение силы резания;

$$P_{z.\text{табл}} = 135 \text{ Н}$$

$$K_1 = 0,8 \quad K_2 = 1$$

Підставивши значення в формулу (2.17), отримаємо:

$$P_z = 135 * 0,8 * 1 = 108 \text{ Н}$$

Тоді потужність буде:

$$N_{\text{рез}} = \frac{108 * 210,8}{1020 * 60} = 0,372$$

Щоб потужність приводу верстата 1А64 була достатня для здійснення токарної операції, необхідно щоб виконалось умова нерівності:

$$N_{\text{рез}} \leq N_{\text{шп.ті}} \quad (2.18)$$

Потужність, що витрачається на обертання шпинделя верстата дорівнює

$$N_{\text{шп}} = N_{\text{дв}} * \eta, \text{ кВт} \quad (2.19)$$

У верстата 1А64

$$N_{\text{дв}} = 17 \text{ кВт}$$

$$\eta = 0,8$$

Підставивши значення в формулу (2.19), отримаємо

$$N_{\text{шп}} = 17 * 0,8 = 13,6 \text{ кВт}$$

Перевіряємо нерівність (2.18)

$$13,6 < 17$$

Нерівність виконано. Отже, потужність приводу верстата 1А64 достатня для здійснення даної токарної операції. Обробка можлива.

Основне технологічне час визначається за формулою  $T_0 = \frac{L}{S * n}$ , хв

$$T_0 = \frac{2}{0,4 * 6850} = 0,01, \text{ хв}$$

Решта результатів розрахунків режимів різання, сил різання потужності і основного технологічного часу по кожній операції зведемо в таблицю 2.10.

Таблиця 2.10. Режими різання обробки заготовки валу

Номер операції	Зміст операції		Глибина різання, t, мм	Подача, S, мм/об	Швидкість різання V, м/хв	Частота обертів, n, об/хв	Сила різання, Pz, Н	Основний час To, хв	Потужність різання, N, кВт
015	Точити Ø12, l=12	Чернова	10	0,16	191,25	5100	2227,5	0,12	6,96
		Чистова	6	0,16	191,25	5100	2227,5	0,12	6,96
	Точити канавку Ø9,8, b=2	Чистова	2,2	0,4	210,8	6850	108	0,01	13,6
	Точити Ø19,5, l=31	Чернова	5	0,3	196,4	5635	210	1,1	12,4
		Чистова	3,5	0,3	196,4	4350	180	0,35	12,4
	Точити Ø20, l=20	Чернова	4	0,45	150	5570	220	1,4	13,1
		Чистова	2	0,45	155	5570	220	0,25	12,9
	Точити Ø19, l=31	Чернова	6	0,3	182,3	5320	190	1,7	9,2
		Чистовая	3	0,3	201	5320	190	0,34	9,2
	Точити Ø19, l=33	Чернова	6	0,25	191	4420	211,3	1,9	5,6
		Чистовая	3	0,27	191	4420	211,3	0,46	7,8
	Точити Ø20, l=17	Чернова	5	0,4	323	5331	180	1,26	7,5
		Чистова	3	0,4	323	5332	180	0,33	7,6
	Нарізати різьбу	Чернова	2,2	0,3	191,2	4460	210	12,3	5,6
Сняти фаски	Чистова	0,5	0,25	191,2	4460	190	7,2	5,2	
020	Точити Ø19,5, l=21	Чернова	5,5	0,3	180	5260	220	1,2	6,1
		Чистова	3	0,33	166	5100	220	0,8	8,9
	Точити канавку Ø15, b=4	Чернова	10,5	0,2	210	5600	230	2,1	9,1
		Чистова	2,5	0,2	190	5420	210	0,7	9,1
	Точити Ø20, l=26	Чернова	4	0,4	180	5530	191,2	1,8	8,7

		Чистова	4	0,4	190	5530	191,2	0,8	8,7
	Точити Ø26, l=2,5	Чистова	1	0,5	186	6655	211	0,5	14,2
	Зняти фаски	Чистова	0,5	0,4	180	6534	190	3,6	11,2
025	Фрезерувати паз t=2,5, l=20,5	Чистова	2,9	0,015	190	6523	212,3	6,7	9,8
030	Довбити шліці	Чистова	3,5	10	15	6597,5	196,5	9,5	6,6
035	Шліфувати пов. Ø20, l=17	Чистова	2	0,6	52	5236	211	5,2	7,5
045	Шліфувати пов. Ø12, l=10	Чистова	1	0,5	50	4365	180	4,1	6,2
	Шліфувати пов. Ø20, l=20	Чистова	2	0,65	55	5620	191,23	6,01	7,5
	Шліфувати пов. Ø20, l=17	Чистова	1	0,65	55	6252	201	5,44	6,2
	Шліфувати пов. Ø26, l=2,5	Чистова	1	0,67	40	4236	190	2,1	5,6
	Шліфувати канавки	Чистова	1	0,4	35	5321	183	4,6	6,5
	Шліфувати канавку	Чистова	1	0,5	30	5369	175	4,1	7,5
050	Полірувати Ø20, l=26	Чистова	0,5	0,4	20	4254	167	2,1	9,5

## 2.8. Вибір різального інструменту за системою ISO 9001

Ріжучий інструмент, необхідний для обробки заготовки вал зведемо в таблицю 2.11.

Таблиця 2.11 Інструмент стандарту ISO 9001 виробник ISCAR

Номер операції	Найменування операції	Найменування, тип і основні розміри ріжучого інструменту, в мм
015	Токарна	Різець токарний прохідний SECO PWBNN2525HW з пластиною WNMG060408-M3 TP2000 Розміри: $H \times B = 25 \times 25$ ; $L = 100$ ; $\varphi = 45^\circ$ ; $\gamma = 20^\circ$ .
020	Токарна	Різець токарний прохідний SECO PWBNN2525HW з пластиною WNMG060408-M3 TP2000 Розміри: $H \times B = 25 \times 25$ ; $L = 100$ ; $\varphi = 45^\circ$ ; $\gamma = 20^\circ$ .
025	Фрезерна	Шпонкова цільна твердосплавна фреза (по ГОСТ 16463-80) з циліндричним хвостовиком. Розміри: $d=3$ мм, $l=6$ мм, $L=32$ мм
030	Зубодовбальна	Хвостовий прямозубий довб'як типу 4 (по ГОСТ 9323-79). Розміри: модуль 1,5, число зубів 18, дільний діаметр 27 мм, конус Морзе B18, $L=80$ мм
035	Шліфувальна	Шліфувальний круг на керамічній зв'язці $D=3-25$ мм, $H = 1-40$ мм, зернистість 40-10
045	Шліфувальна	Шліфувальний круг на керамічній зв'язці $D=3-25$ мм, $H = 1-40$ мм, зернистість 40-10
050	Полірувальна	Шліфувальний круг на керамічній зв'язці $D=3-25$ мм, $H = 1-40$ мм, зернистість 40-10

## **2.9 Автоматизований процес виготовлення деталі "Вал" на токарно-фрезерному верстаті з ЧПУ**

В даному розділі представлений автоматизований процес токарно-фрезерна обробка деталі "Вал" (рис.4.1) з ілюстрованими переходами і описом операцій. Як програма для реалізації обробки деталі була обрана Feature Cam (компанії AUTODESK) - пакет для підготовки високоефективних управляючих програм для токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ, а також SolidWorks для

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

AUTODESK Feature Cam дозволяє підвищити продуктивність верстатів 1, одночасно з цим, досягти найвищої якості при виготовленні деталей і оснастки.

Мета даного розділу - показати приклад одного з можливих варіантів механічної обробки із застосуванням 4-х координатного верстата, а також підвищення ефективності та продуктивності при створенні керуючих програм для верстатів з ЧПУ в умовах серійного виробництва.

Основні переваги пакету Feature Cam:

- Гнучкі стратегії чорнової і чистової обробки;
- Висока швидкість розрахунку керуючих програм;
- Автоматизована оптимізація подач для скорочення часу обробки;

- Інтегровані засоби візуалізації обробки;
- Перевірка і виключення врізів;
  - Імпорт твердотільних, поверхневих і Фасетное моделей, а також каркасної геометрії в різних форматах: AutoCAD, STL, STEP, IGES, Parasolid;
  - Автоматичне розпізнавання типових елементів (отвори, кишені, кишені і т.д.) і їх обробка;
  - Закриття отворів і пазів для виключення їх обробки;
  - Гнучкий механізм кордонів для обмеження зони обробки;
  - Генерація карт налагодження для керуючих програм;
  - Контроль зіткнень з урахуванням патрона, інструменту, органів верстата і оправлення.

### **2.10 Створення моделі і симуляція обробки деталі**

На початку створюємо тривимірну твердотільну модель деталі і на підставі розрахованих припусків на механічну обробку створюємо заготовку за допомогою CAD програми SolidWorks 2021 (рис.4.2). Тривимірна модель деталі служить не тільки для кращої візуалізації, але і по ній в кінцевому підсумку проводять порівняння після комп'ютерної обробки. Це дає можливість швидко перевірити місця, де залишився припуск, і де могли виникнути заріз і зіткнення.

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

## **2.11 Вибір стратегії обробки і устаткування**

В основі вибору стратегії обробки варто розрахунок мінімального основного технологічного часу, тому що економічний ефект буде багато в чому визначатися саме часом обробці. Для даної заготовки виберемо верстат, який є в базі програми, тому що це демонстраційна версія. У пакеті Feature CAM 2019 існує утиліта для створення моделі верстата, завдяки якій можна створити модель будь-якого токарно-фрезерного верстата в умовах реального виробництва. Також в програмний комплекс входить утиліта для написання і редагування постпроцесорів.

Проводимо токарних операцію (точіння заготовки з обох сторін). Як пристосування використовуємо обертається центр і патрон. Це пристосування дає можливість вести обробку заготовки без переустановлення, що в свою чергу дає нам не тільки економію часу, але і виключає похибка при перевстановлення. Як ріжучий інструмент застосовуються чистові і чорнові прохідні верстати, устаткування \* різці з пластиною з твердого сплаву зі спеціальним покриттям і фрези для обробки паза.

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2.12 Генерування керуючої програми для верстата з ЧПУ

Після повної обробки в якості результату отримуємо не тільки графічне відображення результату і візуалізацію, але і машинний код для верстата з ЧПУ, тобто відбувається генерація керуючої програми. Фрагмент цієї програми представлено нижче:

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

```
N280 X-120.996 Y-81.702 Z478. B0 C=DC(0)
N290 X-120.996 Y-81.702 Z438.699 B0 C=DC(0) F30.
N300 X-132.449 Y-79.1 Z434.977 B0 C=DC(0) F300.
N310 X-131.778 Y-79.396 Z435.196 B0 C=DC(0)
.
.
.
.
N68300 X-119.758 Y53.008 Z-46.722 B18. C=DC(-180.)
N68310 X-125.938 Y53.008 Z-27.701 B18. C=DC(-180.) F3000
N68320 TROFF
N68330 M5
N68340 M30
```

Висновок: дані технічні можливості програм і обладнання на сьогоднішній день дозволяють виключити на 90% можливість появи небажано шлюбу ще на стадії проектування і створення КП для верстатів, що в свою чергу, позитивно відбивається на економічній ефективності.

Також варто додати, що застосування таких обробних центрів дозволяє скоротити значний верстатний парк, тобто відбувається комбінування можливостей різних моделей в одному верстаті.

### 3. СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вибір ріжучого і вимірювального інструмента для параметричних моделей в систему FeatureCAM.

Для зовнішнього точіння торців та зовнішніх поверхонь точінням обираємо різець з каталогу *Taegutec* з такими даними:

---

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

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

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

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

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

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

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

---

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

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

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

| | | | |

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

## 4. НАУКОВО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

Оптимальним управлінням вважатимемо такий вплив на процес різання, що у кожний час забезпечує максимум продуктивності (мінімум собівартості) при задоволенні всім умовам обмежень. У цьому розумінні завдання оптимізації є однокритеріальною і може бути вирішена класичними методами нелінійного прораммування, тобто можуть бути однозначно визначені оптимальні керуючі дії. Під керуючими впливами зазвичай розуміють подовжню подачу на оборот заготівлі та швидкість різання, а глибину різання вважають головним обуренням. Таким чином, теоретично, для заданих умов токарної обробки існують такі постійні значення подовжньої подачі на оборот заготівлі та швидкості різання, що призводять до максимуму продуктивності. Однак, на практиці, при виконанні будь-якого процесу різання жоден із його параметрів не залишається постійним. Це визначається безперервною зміною, як зовнішніх збурень, і характеристик самої технологічної обробної системи (ТОС) [4].

В кожний момент часу процесу підтримки його вихідних характеристик оптимальному рівні необхідно безупинно визначати нові оптимальні величини керуючих впливів та діяти ними на процес різання. Таким чином, оптимальне управління має бути перманентним, враховувати змінні умови різання та виконуватися автоматично. Для задоволення таким вимогам найбільше підходять САУ, які керують подачею, швидкістю різання, а іноді і глибиною різання [4, 7, 10].

### 4.1 Створення структури оптимального управління

Основні труднощі реалізації оптимального управління за допомогою замкнутої системи автоматизованого управління (САУ) обумовлені принциповою неможливістю створення вимірювального приладу продуктивності або собівартості, щоб застосовувати його як датчик зворотного зв'язку. Тому оптимально керувати процесом різання можна тільки

на основі оцінки допоміжних параметрів, пов'язаних з необхідним критерієм оптимальності відповідної апріорної математичної моделі.

У сучасних САМ-системах технологічної підготовки виробництва найбільш раціональним є оптимальне керування, яке реалізовано програмними засобами. Взагалі, для оцінки обурень та отримання інформації про фактичний хід процесу різання в САУ оптимального управління застосовують різноманітні підходи, що ґрунтуються на непрямому вимірі припуску [10], температура зони різання [11], темпи зношування інструменту [12]. Найбільш близьким до запропонованої САУ є метод, який оцінює процес за поточним значенням перерізу шару припуску, що зрізається.

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

швидкості різання). Розраховані таким чином величини надходять на модуль програмного управління, який виробляє команди відповідних приводів верстата.

Таким чином, основною такою САУ оптимізації процесу різання є його оптимізаційна математична модель, яка пов'язує критерій оптимізації з керуючими впливами-подачі та швидкістю різання. В результаті вирішення задачі оптимізації знаходять керуючий вплив, який забезпечує максимум

продуктивності або мінімум собівартості при безумовному виконанні вимог обмежень щодо якості обробки. Крім традиційних критеріїв оптимізації (продуктивність та собівартість) залежно від результатів техніко-економічного аналізу застосовують критерій максимальної інтенсивності зняття припуску. Іноді з виробництва ставиться таке завдання-досягнення максимальної продуктивності чи мінімальної собівартості при заданих значеннях стійкості інструмента.

Розробка математичної моделі процесу різання є найважливішим етапом створення алгоритму оптимізації. При традиційному, класичному підході математична модель будується у вигляді системи рівнянь та нерівностей, які виражають зв'язки між керуючими впливами, обмеженнями та прийнятими критеріями оптимальності на основі класичних залежностей теорії різання [12, 13].

Для випадку обробки поздовжнім точінням за один прохід з постійною глибиною різання, що дорівнює припуску на обробку (ідеальний випадок), режим різання буде оптимальним при такому поєднанні подачі та швидкості різання, коли основний технологічний час буде мінімальним. Таке оптимальне рішення знаходять, відшукуючи такі невід'ємні значення керуючих впливів (подачі  $S$  і частоти обертання  $n$  шпинделя) при задоволенні всім обмеженням, які доставляють мінімум критерію оптимальності-технологічного часу  $t_0$ . Таким чином, для випадку поздовжнього точіння, оптимізаційна математична модель може бути виражена наступною системою рівнянь і нерівностей. Зв'язок між управліннями  $S$  і  $n$  та періодом  $T$  стійкості інструменту, які визначають його ріжучу здатність, отримують за відомою з теорії різання залежності:

$$v = \frac{\pi D n}{1000} = \frac{C_v k_v}{T^m H^{x_v} S^{y_v}}$$

звідки

$$nS^{y_v} = \frac{318C_v k_v}{DT^m H^{x_v}} \quad 4.1$$

де,

$v$  – швидкість різання, м/хв;  $\pi$  – постійна величина 3,14;  $n$  – частота обертання, об/хв;  $H$  – глибина різання, мм;  $T$  – період стійкості інструменту, хв;  $S$  – подача мм/об,  $m$ ,  $v$ ,  $x$ ,  $y$  – виправні коефіцієнти на матеріал, сил різання, режимів обробки.

Оскільки всі залежності, що становлять математичну модель, є емпіричними, слід не забувати про розмірність фізичних величин, що входять до них. Зазвичай ці розмірності не відповідають СІ-розмірностям.

У математичній моделі (3.1) необхідно враховувати відомі з практики обробки в'язанням в залежності від стійкості різця не тільки від матеріалу заготовки та інструменту, а й геометричних параметрів різальної частини різця в плані. Вплив головного та допоміжного кутів у плані різця відображається відомими [4, 7, 12] залежностями для допустимої швидкості різання:

$$v = \frac{C_\varphi}{\varphi_{ін}}, \quad v_1 = \frac{C_{\varphi 1}}{\varphi_{ін 1}}$$

Такі залежності входять до математичної моделі процесу різання, а їх вплив на обмеження (3.1) виконується за рахунок коефіцієнта  $k_v$ , величина якого розраховується за конкретними умовами обробки. Наступне обмеження-за потужністю різання  $N_p$ , кВт:

$$N_p = \frac{P_z \pi D n}{1000 \cdot 6 \cdot 10^4} = \frac{C_p h^{x_p} S^{y_p} k_p \pi D n}{6 \cdot 10^7} \leq N_{cm} \eta,$$

звідки 
$$nS^{y_p} \leq \frac{1,91 \cdot 10^7 N_{cm} \eta}{C_p h^{x_p} k_p D}, \quad 4.2$$

де  $N_{cm}$  – ефективна потужність верстата в кВт;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії;

$C_p, k_p, x_p, y_p$  – коефіцієнти та показники емпіричної залежності сили різання від режиму та умов обробки.

Подача, що допускається необхідною шорсткістю обробки, може бути визначена за детермінованою складовою профілю шорсткості обробленої поверхні, яка, у свою чергу, визначається за геометричними залежностями формування мікронерівностей поверхневого шару деталі для кожного з чотирьох можливих профілю [12, 13, 15].

#### 4.2 Блок-схема алгоритма досліджень

Для вирішення такого завдання доцільно використати чисельний метод, який побудований за ітеративним принципом наближення із заданим кроком до вирішення відповідно до алгоритму, блок-схема якого представлена на малюнку 3.2.

Такі випадки визначаються співвідношеннями між геометричними параметрами вершини різця у плані (головний  $\varphi$ , допоміжний  $\varphi_1$  кути в плані і радіус  $r$  округлення вершини різця в плані) і подачею  $S$  навпаки заготовки.

При  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином головного і допоміжного різальних лез інструменту, при  $\varphi > \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином допоміжного різального леза і радіусною частиною вершини інструменту, при  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 > \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином головного різального леза і радіусної частини вершини інструменту, а при  $\varphi < \arcsin(S/2r)$  і  $\varphi_1 < \arcsin(S/2r)$  виступ профілю формується перетином винятково радіусних частин вершин інструменту. Таким чином, в умову визначення допустимої (по шорсткості) подачі входить сама подача, що унеможливорює отримання відповідної аналітичної залежності [4].

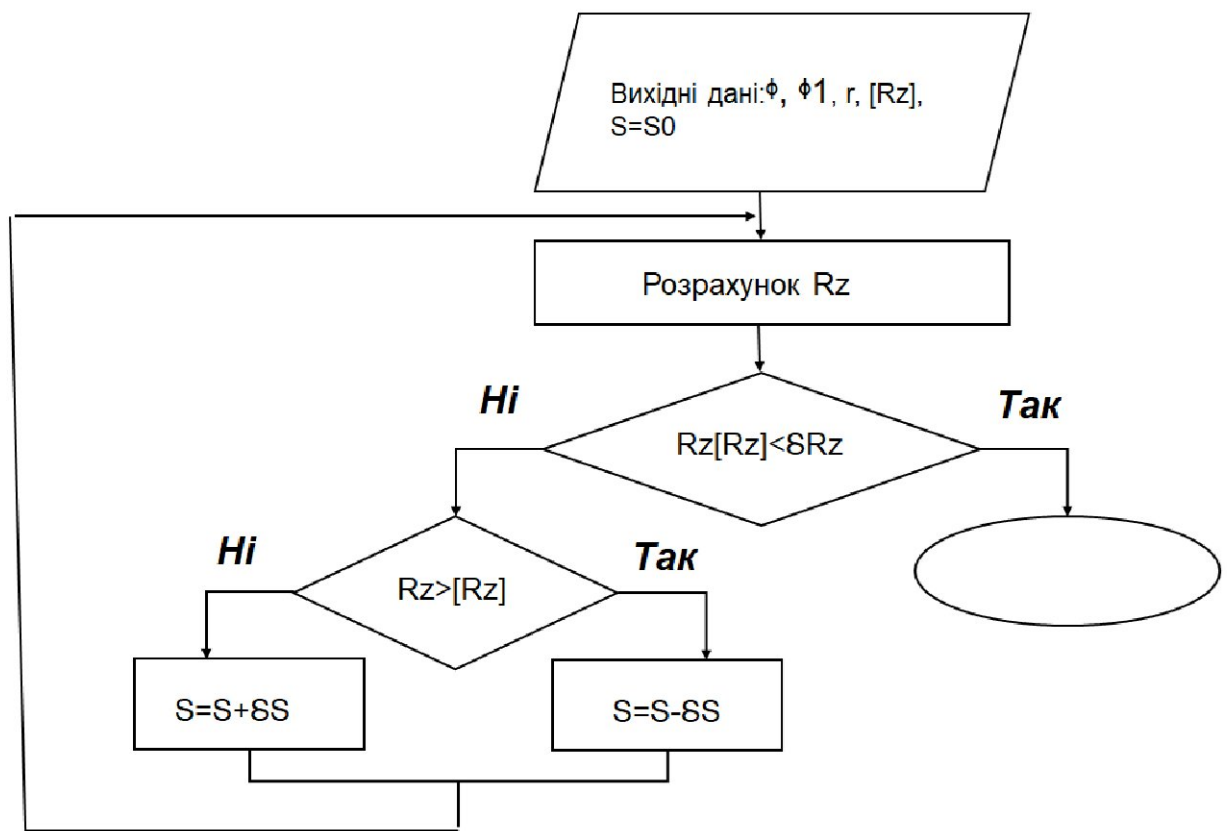


Рисунок 4.2 – Блок-схема алгоритму

Наступне обмеження, яке накладається на поздовжню подачу, вибирається з умов міцності жорсткості ТОС. Наприклад, подача за максимальною силою, яку забезпечує привід подачі верстата, може бути розрахована за наступною залежністю:

$$[S_p]_{\text{доп}} = \left( \frac{2P_n}{C_p h^{x_p} k_p} \right)^{\frac{1}{Y_p}}$$

Подача, що допускається, вибирається як найменша з подач, які розраховані за міцністю інструменту  $[S_l]_{\text{доп}}$  або тяговою силою механізму подачі верстата  $[S_p]_{\text{доп}}$ :

$$S \leq \min\{ [S_p]_{\text{доп}}, [S_l]_{\text{доп}} \}. \quad (4.3)$$

Конструктивні обмеження які визначаються за можливостями металорізального верстата:

діапазон поздовжніх подач:

$$S_{\min} \leq S \leq S_{\max}, \quad (4.4)$$

діапазон частот обертання шпинделя:

$$n_{min} \leq n \leq n_{max}. \quad (4.5)$$

Як оцінну функцію за критерієм максимальної продуктивності приймають

$$f = nS \rightarrow \max, \quad (4.6)$$

оскільки при цьому основний час обробки  $t_0 = L/n \rightarrow \min$  (де  $L$  – довжина обробки).

Отримана математична модель (3.1) – (3.6) складає ядро прикладної програми "Оптимізація точіння" [4], яку ми будемо використовувати для оптимізація режимів різання при точінні.

### 4.3 Оптимізація режимів різання при точінні

Для виконання роботи використовується прикладна програма [4], інтерфейс представлений на малюнку 4.2. Інструкції та пояснення для роботи з програмою містяться в самій програмі та з'являються на екрані монітора при натисканні кнопки "Help".

Після активації програми, введення даних відповідно до варіанта та натискання кнопки "Застосувати дані" у графічному вікні інтерфейсу з'являються всі розраховані обмеження, що утворюють область  $D$  допустимих значень частоти обертання шпинделя та подачі, яка відповідає представленим на інтерфейсі вихідним даним верстата і процесу різання. На малюнку 4.2 ця область утворена перетином наступних обмежень: 1 – мінімальна подача, 3 – мінімальна частота обертання шпинделя, 5 – мінімальна подача по шорсткості поверхні, 7 – обмеження за стійкістю інструменту, 8 – обмеження за потужністю верстата. Лінія 9 відображає функцію оптимізації за максимальною продуктивністю і задовольняє залежності (4.6).

Лінія 9 з'являється у графічному вікні інтерфейсу та пересувається в ньому за перехрестям мишки. Для визначення оптимальних координат області допустимих значень необхідно перевести мишку так, щоб лінія максимальної продуктивності була дотичною до найбільш віддаленої від початку координат

вершини області допустимих значень, а перехрестя мишки збіглося з такою вершиною.

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

Після натискання лівої клавіші мишки, при утриманні її перехрестя у вершині області допустимих значень, на інтерфейсі з'являються оптимальні величини режиму різання. Визначається такі складові режиму різання та його головні характеристики: частота обертання шпинделя (952 об/хв), подача на оборот (0,42 мм/об), швидкість різання (149,5 м/хв), поздовжня подача (400 мм/хв), потужність різання (7,54 кВт), що становить сили  $P_z$  різання (3023,7 Н).

Звертаємо увагу на те, що відповідно до прийнятого критерію оптимальності - максимальна продуктивність - його величину зручно оцінювати безпосередньо за величиною поздовжньої подачі.

В якості прикладу виконання роботи нижче представлено перебіг досліджень для вихідних даних, які вказані у вікнах головного інтерфейсу програми на малюнку 4.2.

Для виконання експериментальних досліджень за першими трьома завданнями, які виконуються у функції глибини різання, перед активацією прикладної програми необхідно скласти таблицю експериментальних даних визначивши діапазон і крок зміни глибини різання (табл. 4.1). На малюнку 4.3 представлено стан області  $D$  допустимих значення частоти обертання шпинделя та поздовжньої подачі під час проведення експериментальних досліджень за

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

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

Тут прийняті ті самі позначення, що і на малюнку 4.2: лінія 1 і 2 - обмеження по мінімальній і максимальній подачі, лінія 3 і 4 - обмеження по мінімальній і максимальній частоті обертання шпинделя, лінія 5 - обмеження подачі по заданій шорсткості, лінія 6 - обмеження подачі за допустимою силою механізму подачі приводу верстата, лінія 7 - обмеження за стійкістю інструменту, лінія 8 - обмеження потужності верстата. Лінія 9 відображає оцінну функцію оптимізації максимальної продуктивності. Видно, що зі зміною глибини різання вершина А області допустимих значень, яка відповідає оптимальному (за продуктивністю) режиму різання, утворюється перетином різних обмежень. Так, при глибині різання 1 мм ця вершина утворена обмеженнями по стійкості інструменту і необхідній шорсткості поверхні, а при глибині 4 мм - обмеженнями за потужністю різання і максимально допустимою силою приводу подачі. Отримані експериментальні дані, що визначають оптимальний режим різання за різних величин глибини  $H$  різання представлені в таблиці 4.1. За експериментальними даними з використанням пакету Excel побудовано графіки відповідної залежності, що представлені на рисунку 4.4.

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

Аналіз отриманих експериментальних результатів (рис. 4.4) свідчить, що закон оптимального управління має дві зони:

1) оптимальна обробка до глибини різання 3 мм відбувається з постійною подачею на заготовлю, проте частота обертання зменшується майже за лінійною залежністю;

2) оптимальна обробка з глибиною, яка перевищує 3 мм, виконується з постійною частотою обертання заготовки, проте поздовжня подача знижується також майже за лінійною залежністю.

При проведенні експериментів можна помітити, що оптимальна точка фазової площини n-S утворюється в основному трьома обмеженнями: стійкістю, потужністю і шорсткістю. До глибини різання 3 мм основним обмеженням, яке накладається на подачу, є обмеження необхідної шорсткості обробленої поверхні. При збільшенні глибини різання набуває чинності четверте обмеження-за силою подачі верстата.

Подібні числові значення розрахунків режимів різання були отримані і при класичному аналітичному методі корегування стосовно геометрії ріжучого інструменту, матеріалу і параметрів деталі [12, 13, 16], відносна похибка розрахунків не перевищувала 6-8%. Це говорить про те, що модель перевірна на адекватність результатів режимів механічної обробки стосовно нашої деталі «Стакан підшипниковий правий» та його геометричних параметрів.

Далі ми послідовно повторюємо процедуру зміни вхідних даних для кожного технологічного переходу при точінні (поперечному, подздовжьому, розточування, точінні канавки та відрізання). Отримані результати заносимо в таблицю 3.2. де скореговуємо режими різання для кожного випадку при точінні.

Таблиця 4.2

Оптимізовані режими різання токарних операцій на верстаті з ЧПК

Назва операції	Глибина, мм	Подача, мм/об (мм/зуб)	Швидкість, м/хв
Підрізання торців	-	0.427	228
Точіння зовнішнє (чорнове)	3.0	0.418	232

Точіння зовнішнє (чистове)	0.85	0.162	267
Розточування (чорнове)	2.25	0.281	188
Розточування (чистове)	0.25	0.143	241
Точіння внутрішньої канавки	1.15	0.182	215
Відрізка деталі	-	0.221	194

Примітка. Значення режимів різання при фрезеруванні, свердлінні та формоутворенні нарізі не оптимізувались, а обирались як середьозважене з діапазону режимів рекомендованих виробником та врахуванням паспортних діапазонів режиму обробки верстата з ЧПК

Саме з таб.4.2 беремо скореговані режимі різання і заносимо до налаштувань кожного технологічного переходу (операції) механічної обробки у інтерейсі програми FeatureCAM (рис.3.5).

Свойства точения - точение1

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

Оптимізовані режимі різання також відображаються у карті технологічних налаштувань «ДОДАТОК Б» та керуючій програмі (NC-файл) для верстата з ЧПК «ДОДАТОК В».

## ВИСНОВКИ

1. Проаналізовані конструктивні особливості деталі, матеріалу та надана загальна характеристика об'єкта дослідження, виконаний якісний аналіз технологічності конструкції деталі.

2. Якісно виконана тривимірна модель у CAD-системі SOLIDWORKS за технічними вимогами кресленика і технічного завдання. Модель використовувалась як цифровий еталон у подальшому складанні технології автоматизованої обробки.

3. Складена оптимальна технологія механічної обробки деталі. Застосований прогресивний ріжучий інструмент стандарту ISO, оснащення для сучасного багатоцільового верстата з ЧПК. Програмна реалізація і комп'ютерний експеримент з розрахунку автоматизованої технології механічної обробки реалізований у програмі Autodesk FeatureCAM.

4. Одержані чисельні результати досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні технічної задачі токарної обробки деталей з чавуну на багатовісних обробних центрах, що містять сукупність скорегованих методик та алгоритмів для прогнозування їхньої оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту з твердих сплавів. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення різних марок сталей, сплавів та чавунів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні, результатами вимірювань силових параметрів різання. Максимальна відносна похибка розрахунків не перевищувала 5-8%.

5. Обґрунтований і встановлений повний системний зв'язок параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту, інструментального матеріалу і конструкторсько-технологічних чинників деталі на розрахунок оптимізованої технології токарної обробки.

6. Виконана методика значно спрощує громісткі аналітичні розрахунки за класичними методами з купою виправних коефіцієнтів та враховує сучасну

геометрію інструментів показники і режимів різання стосовно конкретної деталі та більш того, може бути адаптована до інших типів деталей типу тіл обертів різних галузей виробництва.

7. Надані практичні рекомендації щодо оптимального використання CAD-CAM систем, коригування результатів технології та режимних параметрів для отримання оптимальних результатів на стадії підготовки виробництва.

8. Виконане дослідження дозволяє моделювати абсолютно всі токарні роботи за рахунок застосування комп'ютерних програм в умовах дефіциту виробництва натурних експериментів та дистанційного навчання; індивіалізувати процес навчання та підвищити ефективність самостійної роботи учня або студента; надає змогу проводити дослідження в таких областях змінення параметрів, які неможливо або небезпечно реалізувати на реальному коштовному обладнанні.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 7806:2015. Національний стандарт України Прокат із легованої конструкційної сталі, онлайн: <http://dkzdnepr.com/wp-content/uploads/2019/06/DSTU-7806-2015.pdf>
2. ДСТУ 8981:2020 Виливки з металів та сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічне оброблення. ДСТУ (Державний Стандарт України).
3. Технічне креслення. Розробка робочих креслеників деталей за креслеником загального виду [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О.Г.Гетьман, Н.В. Білицька, Г.В. Баскова. – Електронні текстові дані (1файл: 10,474Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 150 с.
4. Петраков Ю.В. Лабораторно-комп'ютерний практикум з теорії різання // Рекомендовано МОН України як навчальний посібник для вищих навчальних закладів (Лист МОН України №1.4/18-Г-212), Київ, Політехніка, 2006, 190с.
5. Гейчук, В. М. Функціональне проектування верстатів, роботів та машин в Autodesk Inventor. Частина I [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів, які навчаються за спеціальністю «Галузеве машинобудування» / В. М. Гейчук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,39 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 394 с.
6. Технології формоутворення сучасних складнопрофільних деталей [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 131 «Прикладна механіка» спеціалізацій «Технології виготовлення літальних апаратів», «Технології машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Ю. В. Петраков, С. В. Сохань, В. К. Фролов, В. М. Кореньков. – Електронні текстові дані (1 файл: 15,26 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 380 с.
7. David A. Stephenson, John S. Agapiou Metal Cutting Theory and Practice. Third Edition 2016 by Taylor & Francis Group, LLC 932p.
8. Найкращі рішення для обробки. Лійка необертальних інструментів. Токарна обробка. Обробка канавок. Різьбонарізання. Відрізкація. Метрична версія каталогу 2019. 08/2020 3395080. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.com.ua](http://www.iscar.com.ua) .
9. Найкращі рішення для обробки. Фрезерування. Свердління. Інструментальна оснастка. Метрична версія каталогу 2020-2021. 10/2020 3395081. Member IMC Group ISCAR / [www.iscar.ua](http://www.iscar.ua)
10. Петраков Ю.В., Мацківський О.С. Моделювання фрезерування кінцевими фрезами. Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування №1 (73). 2015.
11. Петраков Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПК: Монографія. – Київ, Січкара, 2011. – 220 с.

12. Дубовой В.М. Моделювання та оптимізація системи: підручник / Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усова А.В. – Вінниця: ПП «ТД Едельвейс», 2017. – 804с.

13. Васильченко Я.В. Математичне моделювання процесів різання та різальних інструментів. Практикум. ДДМА, Краматорськ, 2019. – 249с

14. Добрянський, С.С. Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» / С. С. Добрянський, Ю. М. Малафеев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 13,4 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 379 с. – Назва з екрана.

15. Онофрейчук Н.В. Основи обробки та програмування на верстатах з числовим програмним керуванням: підруч. / Н.В. Онофрейчук. – Львів : Світ, 2019. – 352 с. ISBN 978-966-914-229-0.

16. Кіпчарський В. П. Металорізальні верстати: навч. посіб. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2018. – 143 с.

17. Швець С.В. Металорізальні інструменти: навч. посіб. Суми: Сумський державний університет, 2019. – 272 с.

18. Інноваційне обладнання автоматизованого виробництва. Конструктивні особливості та основи програмування верстатів з числовим програмним керуванням: навч. посіб. для студ. спец. 131 «Прикладна механіка» спеціалізації «Технології комп'ютерного конструювання верстатів, роботів та машин»/КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: Ковальов В.А., Гаврушкевич А.Ю., Гаврушкевич Н.В. Електронні текстові дані. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. - 158 с.

19. Будяк Р.В., Гіосвягенко ЕК., Швець Л.В., Жученко Г.А. Конструкційні матеріали і технології: навч. посіб. Вінниця: ФОП Т.П. Барановська, 2020. - 240 с.