

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**Вдосконалення процесу виготовлення шпинделя
токарного верстата з дослідженням його
конструктивних та силових характеристик**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ПМм-21
Шумчук Олександр Андрійович

(підпис)

Керівник:
к.т.н., доцент
Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 2025 р.
к.т.н., доцент
Гарант освітньої програми:
Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

Луцький національний технічний університет

Факультет Транспорту та механічної інженерії
Кафедра Прикладної механіки та мехатроніки
Другий (магістерський) рівень
освітньо-професійної програми «Прикладна механіка»
Спеціальність 131 Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Р. РЕДЬКО

“ _____ ” _____ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Шумчука Олександра Андрійовича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Вдосконалення процесу виготовлення шпинделя токарного верстата з дослідженням його конструктивних та силових характеристик», керівник кваліфікаційної роботи магістра Четвержук Тарас Іванович к.т.н., доц. каф. ПМіМ затвержені наказом вищого навчального закладу від від «14» червня 2025 р. № 391/01-07
2. Строк подання студентом роботи 02.12.2025 р.
3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, технічна документація токарних верстатів, базовий технологічний процес, конструкторська документація, нормативні дані.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
1. Аналітичний розділ. 2. Технологічний розділ. 3. Дослідницький розділ. 4. Моделювання за допомогою CAD-CAM-CAE систем
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

24.06.2025 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	<i>Аналітичний розділ</i>	<i>01.10.2025</i>	
2.	<i>Технологічний розділ</i>	<i>10.10.2025</i>	
3.	<i>Вдосконалення операцій на базі іноваційних наукових досліджень</i>	<i>30.10.2025</i>	
4.	<i>Електронний варіант кваліфікаційної роботи магістра</i>	<i>16.12.2025</i>	
5.	<i>Представлення роботи до захисту</i>	<i>20.12.2025</i>	

Студент

_____ (підпис)

Шумчук О.А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Четвержук Т.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Шумчук О.А. Вдосконалення процесу виготовлення шпинделя токарного верстата з дослідженням його конструктивних та силових характеристик.– Рукопис.

Атестаційна магістерська робота на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 – Прикладна механіка. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2025.

В кваліфікаційній магістерській роботі представлено комплексне вдосконалення технології виготовлення шпинделя токарного верстата. Проведено оптимізацію вибору заготовки для деталі шпиндель. Впровадження штампування на КГШП дозволило підвищити коефіцієнт використання матеріалу на 5%.

Покращено автоматизацію обробки в технологічному процесі. Застосування верстатів з ЧПУ забезпечило скорочення тривалості технологічного циклу та зниження собівартості операцій. Застосування операції механічного оброблення – суперфінішу підшипникових шийок підвищило якість поверхні та забезпечило її зміцнення.

Розроблено спеціальну конструкцію свердла для глибокого свердління, що на 10% підвищило його стійкість та збільшило продуктивність порівняно зі стандартними методами відведення стружки.

Проведено проєктний аналіз моделювання деформацій шпинделя токарного верстату під максимальними навантаженнями, що дозволило обґрунтувати заходи щодо покращення його конструктивних та силових характеристик.

Ключові слова: шпиндель, технологічний процес, режими різання, шліфування, ріжучий інструмент, моделювання.

ANNOTATION

Shumchuk O. Improving the lathe spindle manufacturing process with research into its design and power characteristics. – Manuscript.

Attestation master's thesis for obtaining the qualification of the second (master's) level of higher education in specialty 131 – Applied mechanics. – Lutsk National Technical University. – Lutsk, 2025.

The master's qualification thesis presents a comprehensive improvement of the manufacturing technology for a lathe spindle. The selection of the blank for the spindle part was optimized. The implementation of forging on a hot-die forging press (HDFP) allowed for a 5% increase in the material utilization factor.

Process automation was improved. The use of CNC machines ensured a reduction in the manufacturing cycle time and lowered operational costs. The application of superfinishing for bearing journals improved surface quality and provided surface hardening.

A special design of a deep-hole drill was developed, which increased its tool life by 10% and enhanced productivity compared to standard chip removal methods.

A design analysis of the lathe spindle deformation under maximum loads was conducted, providing justification for measures to improve its structural and power characteristics.

Keywords: spindle, technological process, cutting modes, grinding, cutting tool, modeling.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОДІЛ	10
1.1 Огляд службового призначення деталі «Шпиндель».....	10
1.2 Аналіз технологічності деталі.....	14
1.3 Аналіз базового технологічного процесу.....	15
1.4 Вибір і проектування заготовки.....	17
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	23
2.1 Вдосконалення технологічного маршруту та плану виготовлення деталі шпиндель.....	23
2.2 Обґрунтування вибору баз.....	26
2.3 Вибір засобів технічного устаткування.....	28
2.4 Розмірний аналіз технологічного процесу.....	30
2.5 Визначення припусків.....	32
2.6 Розрахунок режимів різання.....	37
2.7 Нормування технологічних операцій.....	39
3 ВДОСКОНАЛЕННЯ ОПЕРАЦІЙ НА БАЗІ ІНОВАЦІЙНИХ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	41
3.1 Дослідження та вдосконалення методів шліфування поверхонь шпинделя токарного верстату.....	41
3.2 Вдосконалення та проектування ріжучого інструменту.....	45
3.3 Моделювання деформацій шпинделя токарного верстату.....	51
ВИСНОВОК.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58
ДОДАТКИ.....	62

ВСТУП

Науково-технічний прогрес в машинобудуванні, зокрема у верстатобудуванні, в значній мірі визначає розвиток і вдосконалення всіх інших галузей. Важливими умовами прискорення науково-технічного процесу є зростання продуктивності праці, підвищення конкурентоспроможності та покращення якості деталей та виробів. Вдосконалення технологічних методів виготовлення обладнання має при цьому ключове значення. Якість виробничих машин, надійність, довговічність і економічність в експлуатації залежать не тільки від досконалості її конструкції, але і від технології виробництва. Застосування прогресивних високопродуктивних методів обробки, що забезпечують високу точність і якість поверхні деталей машини, методи поліпшення робочих поверхонь, підвищення ресурсів роботи деталей і машин в цілому – все це спрямовано на вирішення головних завдань: підвищення ефективності виробництва, конкурентоспроможності та якості продукції.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення конкурентоспроможності машинобудівної галузі через впровадження високоточного та продуктивного обладнання. Шпиндель є ключовим вузлом токарного верстата, який безпосередньо визначає точність обробки, якість поверхні та надійність усієї технологічної системи [5]. Сучасними вимогами є підвищення точності та швидкості обробки для машинобудівних деталей передбачають мікронні допуски. Вдосконалення конструкції шпинделя дозволяє мінімізувати биття та вібрації при переході на високошвидкісне різання.

Дослідження силових факторів та жорсткості шпиндельного вузла є критичним для запобігання деформаціям під навантаженням, що дозволяє працювати з новими важкооброблюваними матеріалами. Оптимізація технологічного процесу виготовлення (використання нових методів механічної обробки, термообробки або фінішного шліфування) знижує собівартість виробництва та подовжує термін експлуатації верстата.

Таким чином, комплексне дослідження конструктивних параметрів у поєднанні з оптимізацією технології виготовлення дозволяє створити шпindelний вузол токарного верстата, що відповідає стандартам сучасного автоматизованого виробництва.

Метою роботи є підвищення точності та довговічності токарних верстатів шляхом удосконалення технологічного процесу виготовлення шпинделя та оптимізації його конструктивних параметрів на основі комплексного аналізу силових навантажень.

Для досягнення даної мети поставлені наступні *задачі*:

1. Вивчити службове призначення шпинделя в сучасних умовах металообробки та визначити критичні параметри точності й надійності.

2. Провести аналіз існуючої технології виготовлення: виявити недоліки базового технологічного процесу та визначити етапи, які найбільше впливають на появу похибок обробки.

3. Розробити раціональний маршрут обробки, що мінімізує залишкові напруження та забезпечує стабільну геометричну точність поверхонь.

4. Розробити заходи з удосконалення технологічного процесу із запропонувати впровадженням прогресивних методів обробки, зокрема, фінішного суперфінішування та оптимізації режимів різання.

5. Виконати силове моделювання із дослідженням навантажень на шпindel та деформації під дією сил різання, використовуючи сучасні методи комп'ютерного моделювання (CAE).

Об'єкт дослідження. Шпindelний вузол токарного верстата, а також комплекс чинників, що впливають на його точність, жорсткість та вібростійкість у реальних умовах металообробки.

Предмет дослідження. Конструктивні параметри шпинделя, технологічні методи його механічної та термічної обробки, а також закономірності розподілу силових навантажень і деформацій, що виникають під час виконання технологічних

операцій.

Методи дослідження. Порівняльний аналіз методів обробки, статистичне моделювання технічних характеристик верстатів, аналітичні залежності опору матеріалів та теорії пружності, аналіз напружено-деформованого стану, моделювання теплових деформацій. CAD-CAM-CAE технології в машинобудуванні, методи штучного інтелекту, системний аналіз.

Практичне значення та новизна. Розроблено інженерні та практичні рекомендації для машинобудівних підприємств, щодо вибору режимів обробки та методів контролю силових характеристик шпинделів токарних верстатів. Вдосконалена технологія виготовлення дозволяє збільшити частоту обертання шпинделя на 15-20% при збереженні точності, що скорочує час обробки деталей на сучасних токарних верстатах. *Новизна* ж полягає у встановленні закономірностей впливу нових методів фінішної обробки на силові та демпфуючі властивості шпинделя. На кінцевій операції обробки підшипникових шийок шпинделя застосована обробка суперфінішування, що призводить до покращення якості обробленої поверхні, її зміцнення на 15%.

Особистий внесок здобувача. Основні результати кваліфікаційної роботи, рекомендації та висновки належать автору. Здобувачем самостійно поставлено мету і сформовано задачі дослідження, проведено увесь комплекс технічних і проектних рішень, проведено моделювання.

Апробація результатів роботи. Частина роботи доповідалися на науково-технічній конференції, а саме на V студентській науково-технічній конф. «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» факультету ТМІ ЛНТУ. м. Луцьк, 13 листопада 2025 року.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна магістерська складається із вступу, 3 розділів, висновків та списку використаних джерел. Зміст роботи викладено на 57 сторінках формату А4, містить 17 рисунків та 8 таблиць. Список використаних літературних джерел складається з 29 найменувань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ

1.1 Огляд службового призначення деталі «Шпиндель»

Шпиндель токарного верстата – це основний робочий орган верстата, що являє собою порожнистий сталевий вал, який передає обертальний рух заготовці.

Основне його призначення забезпечення головного виконавчого руху токарного верстату та передача крутного моменту, а також фіксація заготовки, або в деяких випадках інструменту. На передньому кінці шпинделя кріпляться затискні пристрої (патрони, планшайби або центри), які утримують деталь під час обробки [4]. Шпиндель отримує рух від електродвигуна через систему передач (пасову або зубчасту) в передній бабці. Трансмсія привода шпинделя, або шпиндельна бабака представлена на рисунку 1.1. Вона складається з таких компонентів: 1 – токарний патрон або цанга, 2 – передній кінець шпинделя, 3 – підшипники, 4 – вал шпинделя, 5 – дистанційне кільце, 6 –привідна шестерня, 7 – датчик активного контролю, 8 – гідравлічна система мащення.

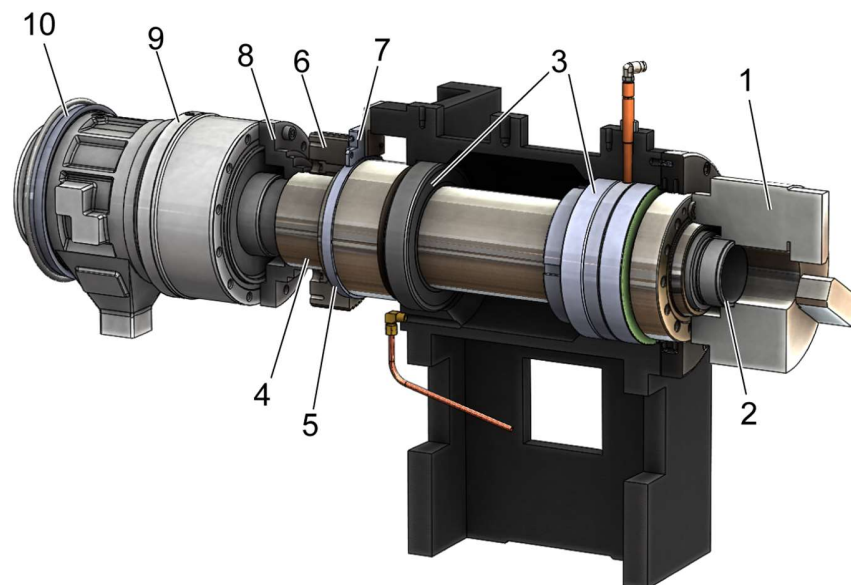


Рисунок 1.1 – Шпиндель токарного верстату

На рисунку 1.2 наведено фрагмент шпиндельного вузла токарного верстата, подібний до типу 1К62 з деякими конструктивними змінами та покращеними технічними характеристиками. На шпиндель 1 напесовані підшипники кочення 2, які у свою чергу запресовані в передню бабку 3. Натяг підшипників здійснюється стопорними гайками 4 і 5. За допомогою шпонки 6 і стопорної гайки 7 на кінці шпинделя 1 встановлюється шків 8.

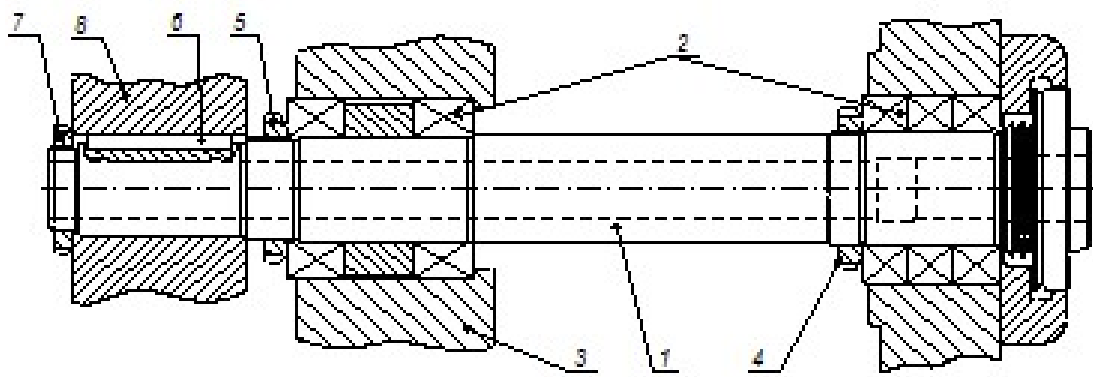


Рисунок 1.2 – Шпиндель токарного верстату

У процесі роботи зі шківа 8 на шпиндель 1 через шпонку 6, передається обертальний рух, який отримує заготовка, яка закріплюється в патроні. Патрон встановлюється на передньому кінці шпинделю, базуючись на зовнішньому конусі.

Шпиндель виготовляється з легированої конструкційної сталі 12ХН3А ДСТУ 7806:2015 «Прокат із легированої конструкційної сталі. Технічні умови» [6]. Область застосування сталі 12ХН3А: сильно навантажені деталі, з високою поверхневою твердістю, зносостійкістю і в'язкою серцевиною, що працюють при великих швидкостях і ударних навантаженнях – шпинделі, вали в підшипниках кочення, шестерні складної конфігурації і т.д. Хімічний склад та механічні властивості сталі 12ХН3А представлені в таблиці 1.1.

Таблиця. 1.1 – Хімічний склад та механічні властивості сталі 12ХН3А

Марка сталі	Хімічний склад, %							Механічні властивості					
	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	σ_B	σ_T	δ	φ	<i>HB</i>	<i>HRC</i>
12ХН3А	0,09...	0,3...	0,6...	2,75...	0,17...	<0,035	<0,035	≥ 85	≥ 70	10	50	260	58...
	0,16	0,6	0,9	3,15	0,37								62

На рисунках 1.3 та 1.4. представлена схема позначень поверхонь та розмірів деталі, а в таблиці 1.2. – класифікація поверхонь за службовим призначенням. Обґрунтування технічних вимог до поверхонь шпинделя, виходячи з його службового призначення зведено в таблиці 1.3.

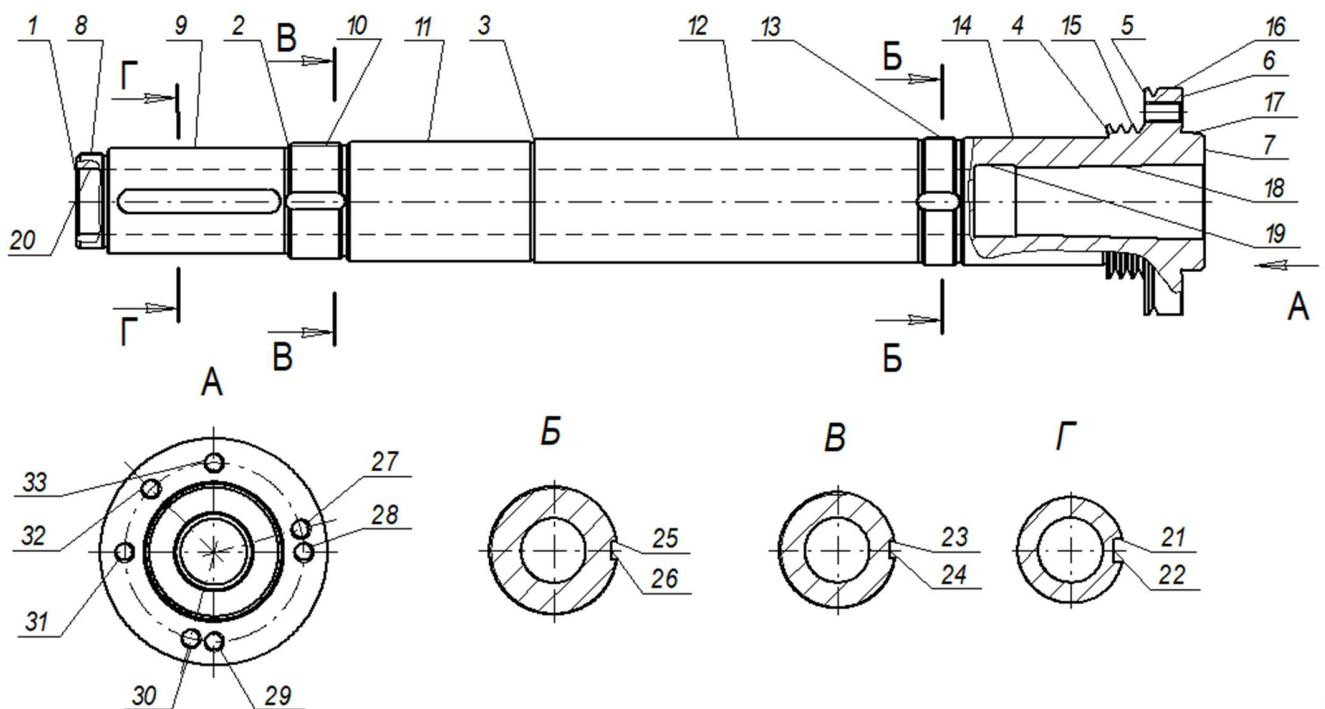


Рисунок 1.3 – Позначення поверхонь шпинделя токарного верстату

Таблиця. 1.2 – Класифікація поверхонь шпинделя

№	Вид поверхні	№ поверхні
1	Виконавчі	17,18
2	Основні конструкторські бази	3,4,11,14
3	Допоміжні конструкторські бази	2,3,4,6,8,9,10,11,13,14,17,18,21...33
4	Вільні поверхні	6,7,12,15,16,19,20,34,35

Таблиця. 1.3 – Обґрунтування технічних вимог до поверхонь шпинделя, виходячи з їхнього службового призначення

Поверхня	Технічна вимога	Причина / Призначення
Площина кріплення патрона	$Ra\ 0,63, \nabla 0,005$ $\uparrow 0,003$	Щільне прилягання патрона / Забезпечення мінімального биття патрона щодо осі шпинделя
Зовнішній конус шпинделя	$Ra\ 0,63, \angle 0,003$ $\uparrow 0,005$	Щільна посадка патрона / Забезпечення мінімального биття патрона щодо осі шпинделя
Опорні шийки шпинделя	$Ra\ 0,08, \odot 0,002$ – 0,003	Забезпечення стабільності осі шпинделя
Опорні торці під підшипники	$Ra\ 0,63,$ $\uparrow 0,002$ $\uparrow 0,006$	Збереження стабільності положення шпинделя в осьовому напрямку
Опорна шийка і торець під шків	$Ra\ 0,63, 1,25$ $\uparrow 0,025$	Забезпечення мінімального биття шківа щодо осі шпинделя
Шпонковий паз	$Ra\ 2,5 \wedge 0,035$ $\Pi\ 0,02$	Рівномірний розподіл навантаження на шпонковий паз
Внутрішній конус	$Ra\ 0,63,$ $\uparrow 0,005$	Точність положення деталі або різального інструменту щодо осі шпинделя
Різьбові отвори на фланці	$Ra\ 1,25$ $\vee 0,15$	Точність кріплення патрона

Згідно завдання – маса деталі 16,8 кг; річний обсяг випуску – 10 тисяч штук, отже тип виробництва – середньосерійне. На основі обраного типу виробництва розглядається стратегія технологічного процесу залежно від базового варіанту.

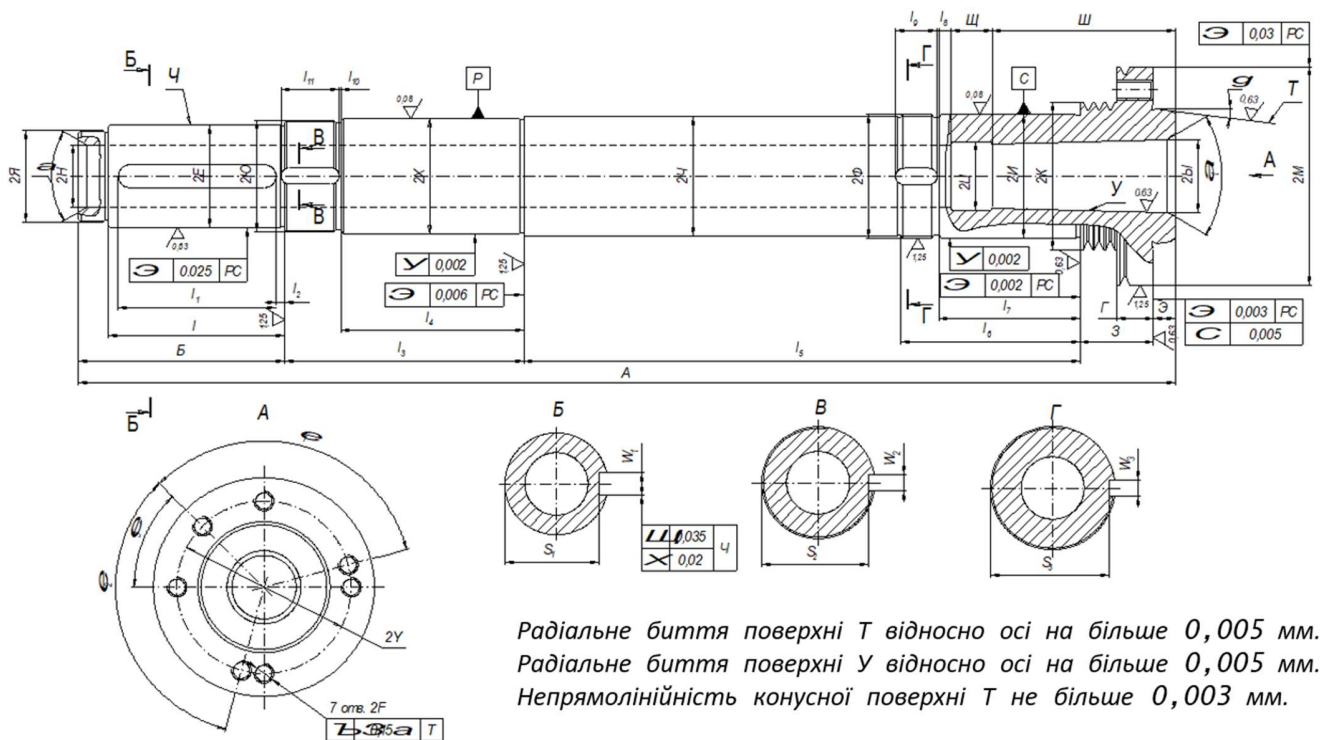


Рисунок 1.4 – Креслення шпинделя токарного верстату

1.2 Аналіз технологічності деталі

До нетехнологічності [3] деталі шпиндель можна віднести такі елементи:

- досить велика довжина деталі $L/D > 8$, що знижує жорсткість і підвищує можливість короблення шпинделя під час механічної та термічної обробки;
- глибокий отвір, що вимагає при виготовленні шпинделя застосування спеціального інструменту;
- закриті шпонковий паз та пази під стопорні багатопелюсткові регулювальні шайби;
- наявність точних конусних поверхонь;
- близько розташовані різьбові отвори на фланці шпинделя;
- наявність масловідвідних канавок вимагає застосування спеціального інструменту – фасонного різця;

Загалом конструкцію можна вважати технологічною та придатною для технологічного оброблення.

1.3 Аналіз базового технологічного процесу

Деталь шпиндель згідно базового технологічного процесу виготовляється в одиничному виробництві. Обладнання та оснащення, яке використовується – універсальне. Заготовка на обробку надходить у вигляді прокату, це збільшує час обробки та відходу металу у стружку. Базовий ТП представлений у таблиці 1.4.

Таблиця. 1.4 – Базовий ТП виготовлення шпинделя токарного верстату

№	Назва операції	Суть операції
000	Заготівельна (прокат)	Відрізати заготовку
010	Токарна	Підрізування та зацентрування торців, попереднє обточування всіх уступів, підрізування фланця
020	Токарна	Точіння шийок під лонети
030	Токарна	Свердління центрального отвору наскрізь з переустановкою заготовки
040	Токарна	Підрізування торців, остаточне розточування конусів з обох боків
050	Токарна	Обточування всіх уступів під шліфування, нарізування канавок при встановленні на центрові пробки
060	Фрезерна	Фрезерування шпонкового паза та пазів під стопорні шайби
070	Термічна (цементация)	
080	Токарна	Обточування уступів під різьблення та нарізати різьбу
090	Свердлильна	Свердління фланцевих отворів та нарізування в них різьби
100	Термічна (загартування, відпуск)	
110	Шліфувальна	Шліфування внутрішніх конусів під центрові пробки
120	Шліфувальна	Шліфування циліндричних уступів попередньо
130	Шліфувальна	Шліфування зовнішнього конуса попередньо
140	Термічна (стабілізуючий відпуск)	
150	Шліфувальна	Напівчистове шліфування переднього Морзе та заднього конуса
160	Шліфувальна	Напівчистове шліфування шийок і торців під підшипники, шліфування інших уступів остаточно
170	Шліфувальна	Чистове шліфування шийок та торців під підшипники
180	Шліфувальна	Шліфування конуса під патрон остаточно
190	Шліфувальна	Шліфування внутрішнього конуса Морзе остаточно
200	Токарна	Полірування шийок під підшипники
210	Контрольна	

Провівши аналіз базового технологічного процесу, було виявлено ряд недоліків (згідно таблиці 1.4.). Шляхи та способи, усунення яких розглянуті в даній роботі під час проектування технологічного процесу обробки деталі шпиндель токарного верстату під час переходу на середньосерійне виробництво.

Далі проведемо аналіз недоліків базового технологічного процесу та шляхи їх усунення. Недоліками даного ТП є:

- 1) Розділено чорнову та напівчистову токарну обробку на окремі операції;
- 2) Чистові та фінішні операції обробки опорних шийок та співвісних з ними зовнішніх поверхонь шпинделя виробляють на спеціальних пробках, які встановлюються з обох сторін у конічні отвори. Пробки слугують технологічними базами.
- 3) На кінцевій операції для досягнення заданого параметра шорсткості застосовується полірування;
- 4) Свердління центрального отвору проводиться перовим свердлом із швидкорізальної сталі.

Далі нами прийнято ряд удосконалених технічних рішень (пропозицій) згідно нумерації та градації недоліків та вказано які технологічні ефекти вони дадуть.

- 1) поєднати чорнові та напівчистові переходи в одну операцію. Завдяки цьому технічному рішенні буде підвищення продуктивності та точності взаємного розташування оброблюваних поверхонь.
- 2) Замість використання пробок як технологічні бази використовувати центрові фаски, виконані з обох боків шпинделя. Відповідно зменшується кількість ланок у технологічному розмірному ланцюзі, похибка установки. Підвищується точність положення виконавчої поверхні центрального отвору щодо поверхонь опорних шийок.
- 3) Застосувати суперфінішну обробку. Цей спосіб обробки забезпечує малу шорсткість поверхні, зменшує похибки форми. Сприятливо впливає на зносостійкість та втомну міцність деталі, зміцнюючи поверхневий шар металу.

4) Спроекувати та/або підібрати свердло для глибокого свердління із твердого сплаву з використанням спеціального обладнання. Це підвищить продуктивність, якість та точність обробки.

1.4 Вибір і проектування заготовки

Для вибору оптимального варіанта одержання заготовки проведемо порівняння двох раціональних способів отримання заготовки для деталі шпиндель токарного верстату – це прокат (за базовим ТП) та поковка. Для заготовок типу шпинделів верстатів не зовсім доцільно використовувати методи лиття, оскільки в подальшому може виникати багато структурних дефектів матеріалу.

Спочатку проведемо розрахунок заготовки з прокату. За основу розрахунку проміжних припусків приймаємо зовнішній діаметр деталі $133_{-0,165}^{-0,060}$ мм. Встановлюємо попередній маршрутний технологічний процес обробки поверхні деталі $133_{-0,165}^{-0,060}$ мм:

Операція 010 Токарна чорнова;

Операція 020 Токарна чистова;

Операція 030 Термічна HRC 59...63;

Операція 40 Шліфувальна.

Визначаємо розрахунковий розмір заготовки:

$$D_{p.z} = D_n + 2z_{10} + 2z_{20} + 2z_{40}, \text{ мм} \quad (1.1)$$

де, $D_n = 133$ мм – номінальний розмір;

$2z_{10} = 9,0$ мм, $2z_{20} = 3,0$ мм, $2z_{40} = 0,9$ мм – припуски на діаметр на операціях 010, 020, 040 [2].

$$D_{p.z} = 133 + 9,0 + 3,0 + 0,9 = 145,9 \text{ мм.}$$

За розрахунковими даними вибираємо розмір гарячекатаного прокату звичайної точності $150_{-2,0}^{+0,8}$ мм за ДСТУ 4738:2007 [11]. Вибираємо прокат – круг

150В/12ЧНЗА. Нормальна довжина прокату 7м. Загальна довжина заготовки тоді має бути:

$$L_3 = L_d + 2z_{\text{п}}, \text{ мм} \quad (1.2)$$

де $L_d = 660$ мм – номінальна довжина деталі;

$2z_{\text{п}} = 3,0$ мм – припуск на підрізування торцевих поверхонь [10].

$$L_3 = 660 + 3,0 = 663 \text{ мм}$$

Визначаємо об'єм заготовки:

$$V_3 = \frac{\pi \cdot D_3^2 \cdot L_3}{4}, \text{ мм} \quad (1.3)$$

Підставивши відповідні числові дані, отримаємо:

$$V_3 = \frac{3,14 \cdot 150^2 \cdot 663,8}{4} = 11,72 \cdot 10^6 \text{ мм}^2.$$

Визначаємо масу заготовки:

$$m_3 = \rho \cdot V_3, \text{ кг} \quad (1.4)$$

де, $\rho = 7,85$ кг/м³ – густина сталі;

$$m_3 = 7,85 \cdot 11,72 = 92,0 \text{ кг.}$$

Неодноразовість залежно від прийнятої довжини прокату:

$$L_{\text{нк}} = L_{\text{пр}} - l_{\text{зат}} - l_{\text{обр}} \cdot x \cdot (L_3 + l_p), \text{ мм} \quad (1.5)$$

де $L_{\text{пр}} = 7\text{м}$ – довжина обраного прокату; $l_{\text{зат}} = 100$ мм – мінімальна довжина затискного кінця; $l_{\text{зат}}$ – довжина торцевого обрізання прокату, мм;

$$l_{\text{обр}} = 0,3 \cdot d_3, \text{ мм} \quad (1.6)$$

де, L_3 – довжина заготовки, мм; $l_p = 6$ мм – ширина різку [17]; x – кількість заготовок, що виготовляються з прийнятої довжини прокату, шт.

$$x = \frac{L_{\text{пр}} - l_{\text{от}} - l_{\text{заж}}}{L_3 + l_p}, \text{ шт.} \quad (1.6)$$

$$l_{от} = 0,3 \cdot 150 = 45 \text{ мм};$$

$$x = \frac{7000 - 45 - 100}{663 + 6} = 10,24 \text{ шт.}$$

Приймаємо $x = 10$ шт.

$$L_{нк} = 7000 - 45 - 100 - 10 \cdot (663 + 6) = 165 \text{ мм.}$$

Загальні втрати матеріалу до довжини вибраного прокату:

$$\Pi_{п.о} = \Pi_{нк} + \Pi_{от} + \Pi_{зак} + \Pi_p, \% \quad (1.7)$$

де, $\Pi_{от}$ – втрати на торцеве обрізання прокату, %

$$\Pi_p = \left(\frac{l_p \cdot 100}{L_{пр}} \right). \quad (1.8)$$

$$\Pi_{нк} = \left(\frac{165 \cdot 100}{7000} \right) = 2,36 \% ;$$

$$\Pi_{от} = \left(\frac{45 \cdot 100}{7000} \right) = 0,64 \% ;$$

$$\Pi_{зак} = \left(\frac{100 \cdot 100}{7000} \right) = 1,43 \% ;$$

$$\Pi_p = \left(\frac{6 \cdot 100}{7000} \right) = 0,09 \% ;$$

$$\Pi_{п.о} = 2,36 + 0,64 + 1,43 + 0,09 = 4,52 \% .$$

Витрата матеріалу на одну деталь з урахуванням усіх технологічних втрат:

$$m_{з.п} = \frac{m_з \cdot (100 + \Pi_{п.о})}{100}, \text{ кг} \quad (1.9)$$

$$m_{з.п} = \frac{92,04 \cdot (100 + 4,52)}{100} = 96,2 \text{ кг}$$

Визначаємо коефіцієнт використання матеріалу:

$$K_{\text{им}} = \frac{m_{\text{д}}}{m_{\text{з.п}}} \quad (1.10)$$

$$K_{\text{им}} = \frac{16,8}{96,2} = 0,17.$$

Далі вибираємо заготовку – поковку отриману на кривошипному гаряче штамповому пресі у відкритому штампі, нагрівання індукційне. Проводимо розрахунок поковки.

Розрахункова маса поковки:

$$m_{\text{з.п}}^{\text{р}} = m_{\text{д}} \cdot K_{\text{р}}, \text{ кг} \quad (1.11)$$

де, $m_{\text{д}} = 16,8$ кг – маса деталі;

$K_{\text{р}} = 1,5$ – розрахунковий коефіцієнт[3];

$$m_{\text{з.п}}^{\text{р}} = 16,8 \cdot 1,5 = 25,2 \text{ кг.}$$

Клас точності вибираємо за [3]. Виходячи зі способу отримання заготовки – на кривошипному гаряче штамповому пресі – Т4. Вибираємо за [11] групу сталь 12ХН3А – група сталі М2.

Визначаємо ступінь складності. Розміри, що описують заготовки фігури (циліндр):

$$D = 133 \cdot 1,05 = 139,6 \text{ мм}; H = 660 \cdot 1,05 = 693 \text{ мм.} \quad (1.12)$$

Маса описуючої фігури: $m_{\text{р}} = 83,2$ кг.

$$m_{\text{з.п}}^{\text{р}} / m_{\text{р}} = 25,2 / 83,2 = 0,3 \quad (1.13)$$

відповідно ступінь складності С3

$$(m_{\text{з.п}}^{\text{р}} / m_{\text{р}} = 0,16 \dots 0,32)$$

Конфігурація поверхні роз'єму штампі – плоска П [3]

Визначаємо основні припуски на обробку, розміри поковки. Припуски визначаємо згідно [17], допуски [18] та зводимо в таблицю 1.5.

Додаткові припуски, що враховують: зміщення по поверхні роз'єму штампу – 0,5 мм. та відхилення від прямолінійності – 1,0 мм. [3].

Таблиця 1.5 – Основні припуски на обробку, розміри поковки

Розмір деталі, мм	Припуск на розмір, мм	Розмір поковки, мм
35	4,3+2,7+2·0,5	43 ^{+2,4} _{-1,2}
22	2,5+2,7+2·0,5	28 ^{+2,4} _{-1,2}
44,2 _{-0,1}	2·2,7+2·0,5	50,5 ^{+2,7} _{-1,3}
124	4,3-3,3+0,5	125,5 ^{+3,0} _{-1,5}
660	2·4,3+2·0,5	669,5 ^{+4,7} _{-2,4}
∅ 62 _{-0,019}	2·3,0+2·(1+0,5)	∅ 71 ^{+2,7} _{-1,3}
∅ 75 ^{+0,015} _{+0,01}	2·3,0+2·(1+0,5)	∅ 84 ^{+2,7} _{-1,3}
∅ 90 _{-0,14}	2·2,7+2·(1+0,5)	∅ 98,5 ^{+2,7} _{-1,3}
∅ 133 ^{-0,060} _{-0,165}	2·3,3+2·(1+0,5)	∅ 142,5 ^{+3,0} _{-1,5}
∅ 82,363 _{+0,01}	2·3,0+2·(1+0,5)	∅ 91,5 ^{+2,7} _{-1,3}

Наступним кроком буде визначення маси поковки:

$$m_3^{\text{пок}} = \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i, \text{ кг} \quad (1.14)$$

де, $\rho = 7,85 \text{ кг/м}^3$ – густина сталі;

V_i – об'єми елементарних фігур, на які можна розбити поковку.

$$m_3^{\text{пок}} = 30,3 \text{ кг.}$$

Розраховуємо об'єм потрібного матеріалу:

$$V = V_{\text{пок}} + V_y + V_o, \text{ мм}^3 \quad (1.14)$$

де, $V_{\text{пок}} = \sum_{i=1}^n V_i$ – об'єм поковки;

$$V_{\text{пок}} = 3,863 \cdot 10^6 \text{ мм}^3.$$

$$V_y = \frac{0,5\% \cdot 3,863 \cdot 10^6}{100\%} = 0,019 \cdot 10^6 \text{ мм}^3;$$

Підставивши числові дані у формули отримаємо:

$$V_o = 1,5 \cdot 21,42 \cdot (1624 + 1,5 \cdot 3,14 \cdot 6) = 0,053 \cdot 10^6 \text{ мм}^3;$$

$$V = (3,863 + 0,019 + 0,053) \cdot 10^6 = 3,935 \cdot 10^6 \text{ мм}^3.$$

Визначаємо коефіцієнт використання матеріалу:

$m_{в.з.} = \rho \cdot V$, кг – маса вихідної заготовки;

$$m_{в.з.} = 7,85 \cdot 3,935 = 30,89 \text{ кг},$$

Коефіцієнт використання матеріалу після проведених розрахунків буде становити 0,54.

Провівши техніко-економічне порівняння методів одержання заготовки (прокату та поковки отриманої на кривошипному гаряче штамповому пресі) а також оцінили та отримали економічний ефект:

$$E = E_{дет}^6 - C_{дет}^м, \text{ грн./шт.} \quad (1.15)$$

для поковки:

$$E = 2905,07 - 924,67 = 1980,4 \text{ грн./шт.}$$

для прокату:

$$E = 2905,07 - 829,79 = 2075,28 \text{ грн./шт.}$$

Проведені розрахунки показують економічно доцільно для деталі шпindelь токарного верстата використовувати заготовки, отримані штампуванням на кривошипному гаряче штамповому пресі.

РОЗДІЛ 2

ТЕХНОЛОГІЧНИЙ

2.1 Вдосконалення технологічного маршруту та плану виготовлення деталі шпindelь

Вдосконалений технологічний маршрут виготовлення деталі шпindelь токарного верстату представлений у таблиці 2.1. При складанні технологічного маршруту використовувалися рекомендації, наведені в [14,15,16].

Таблиця 2.1 – Вдосконалений технологічний маршрут виготовлення шпindelя

№ опер	Найменування обладнання (верстату)	Найменування операції	Зміст операції	№ поверхонь, які обробляються
000	КГШП (Кривошипний гаряче штампувальний прес)	Заготівельна	-	всі
010	Фрезерно-центрувальний н/а МР-73М	Фрезерно-центрувальна	Фрезерувати торці. Свердлити центрувальні отвори.	1, 7
020	Токарний верстат з ЧПК 16К20Ф305	Токарна	Обточити зовнішні поверхні попередньо. Обточити зовнішні поверхні остаточно. Проточити канавки під вихід інструменту. Проточити масловідвідні канавки.	8, 9, 2, 10, 11, 3, 12, 13, 14, 4, 15, 5; 9, 2, 11, 3, 12, 14, 4, 15, 5
030	Горизонтальний верстат для глибокого свердління ОС-5222	Свердлильна	Свердлити центральний отвір наскрізь.	20
040	Токарний верстат з ЧПК 16К20Ф305	Токарна	1-й установ: Проточити торець остаточно, розточити центрову фаску. 2-а установ: Обточити зовнішні поверхні попередньо. Розточити отвір під конус Морзе попередньо. Обточити зовнішні поверхні та проточити торець остаточно.	1, 34 7, 17, 6, 16 18, 19 17, 6, 16, 7

			Розточити отвір під конус Морзе остаточно, розточити центрову фаску.	18, 35
050	Вертикально-фрезерний консольний верстат з ЧПК 6P13PФ3	Фрезерна	Фрезерувати шпонковий паз і пази під стопорні шайби.	21, 22, 23, 24, 25, 26
060	-	Термічна	Стабілізуючий відпуск.	всі
070	Токарний верстат з ЧПК 16K20Ф305	Токарна	Обточити ступені під різьбу для зняття цементованого шару. Нарізати різьбу остаточно.	8, 10, 13
080	Горизонтальний свердлильно-фрезерно-розточувальний верстат з ЧПК 6906ВФ3	Багатоцільова	Свердлити отвори у фланці. Зенкерувати. Нарізати різьбу.	27, 28, 29, 30, 31, 32, 33
090	-	Термічна	Гартування, відпуск, цементация.	всі
100	Горизонтально-доводочний н/а 3925P	Шліфувальна	Шліфувати центрові фаски.	34, 35
110	Круглошліфувальний верстат з ЧПК 3M163Ф2Н1В	Шліфувальна	Шліфувати шийки та прилеглі торці попередньо, а фланець остаточно.	9, 2, 11, 3, 14, 4, 16
120	Торцекруглошліфувальний верстат 3Т161	Торцекруглошліфувальна	Шліфувати зовнішній конус і прилеглий торець фланця попередньо.	6, 17
130	Внутрішньошліфувальний верстат 3А227	Внутрішньошліфувальна	Шліфувати внутрішній конус Морзе попередньо.	18
140	-	Термічна	Стабілізувальний відпуск.	всі
150	Горизонтально-доводочний н/а 3925P	Шліфувальна	Шліфувати центрові фаски.	34, 35
160	Круглошліфувальний верстат з ЧПК 3M163Ф2Н1В	Шліфувальна	Шліфувати шийки та прилеглі торці шпинделя остаточно.	9, 2, 11, 3, 14, 4
170	Суперфінішний центровий верстат 3871К	Суперфінішна	Обробити шийки шпинделя остаточно (суперфінішування).	11, 14
180	Торцекруглошліфувальний верстат ХШ4-11П	Торцекруглошліфувальна	Шліфувати зовнішній конус і прилеглий торець фланця остаточно.	6, 17
190	Внутрішньошліфувальний верстат СШ-37	Внутрішньошліфувальна	Шліфувати внутрішній конус Морзе остаточно.	18

План виготовлення деталі шпиндель токарного верстату відповідає виконаним рішенням попереднього розділу. Технічні вимоги до виготовлення деталей включають вимоги до шорсткості, точності розмірів, форми і взаємного

розташування оброблених поверхонь. На ці параметри призначаються технологічні допуски виходячи з умови:

$$Ta^i \geq \omega A_{ст}^i, \text{ мм} \quad (2.1.)$$

де, Ta^i – допуск на параметр A , заданий при експлуатації;

$\omega A_{ст}^i$ – величина похибки параметра A , яка може виникнути при виконанні даної операції в нормальному стані технологічної системи (статистична похибка)

Значення технологічних допусків на шорсткість оброблюваних поверхонь визначаємо за статистичними даними відносно можливостей методів обробки і вказуємо відповідні позначення.

Допуски на розміри вихідної заготовки, а також шорсткість її поверхні визначають за [3]. Шорсткість оброблених поверхонь залежить від способу обробки, типу обладнання, кількості робочих ходів і в залежності від цих даних визначається згідно [18]. Експлуатаційні допуски на діаметральні розміри при обробці закритої поверхні визначаються з умови:

$$TA^i = \omega A_{ст}^i, \text{ мм} \quad (2.2.)$$

$\omega A_{ст}^i$ – вибираємо відповідно до таблиці допусків залежно від якості точності та номінального розміру. Якість точності, що отримується на цій операції, залежить від виду технологічного обладнання, способу забезпечення точності налагодження інструменту, характеру обробки і вибирається відповідно до [3]. При визначенні робочого допуску на лінійний розмір, що з'єднує вимірювальну та оброблену поверхні, використовують формулу:

$$Ta^i = \omega A_{ст}^i + \Delta_{пр}^i + \varepsilon_6, \text{ мм} \quad (2.3.)$$

де, $\Delta_{пр}^i$ – просторове відхилення вимірювальної бази; ε_6 – похибка базування через невідповідність установочної та вимірювальної баз. Значення ε_6 визначається з урахуванням обраної схеми базування згідно з [8], $\Delta_{пр}^i$ – визначається згідно з [20]. Допуски форми та взаємного розташування вибираються згідно [3].

2.2 Обґрунтування вибору баз

Згідно рисунків 2.1 і 2.2 основними базами деталі шпиндель є поверхні її опорних шийок 11,14. Але використовувати їх неможливо через складність профілю шпинделя і при обробці на різних операціях бази змінюються, тому на операції 020 за технологічні бази беремо поверхні центрових отворів, а на наступних операціях поверхні центрових фасок 34, 35.

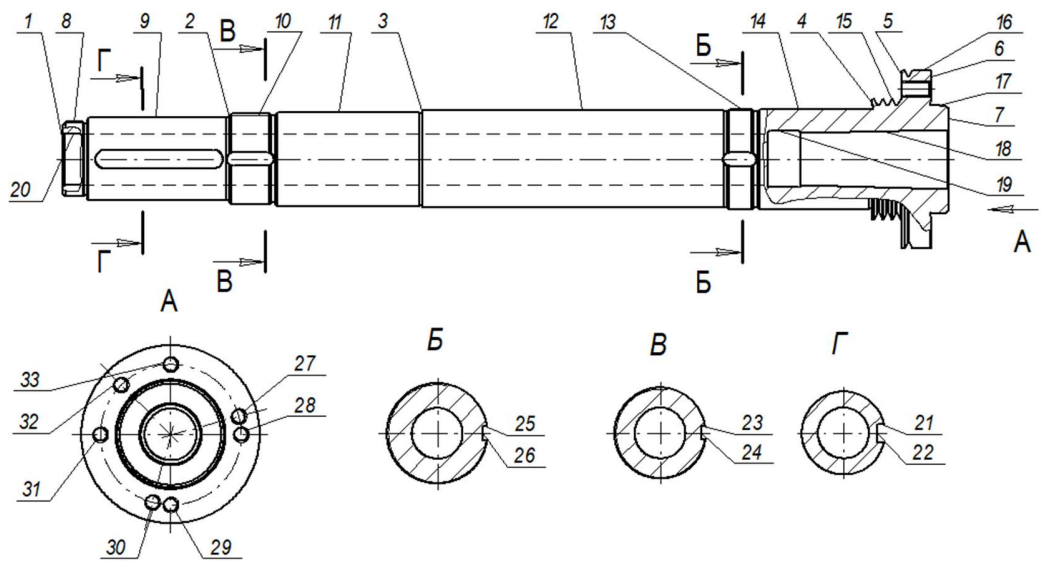


Рисунок 2.1 – Позначення поверхонь шпинделя для вибору баз

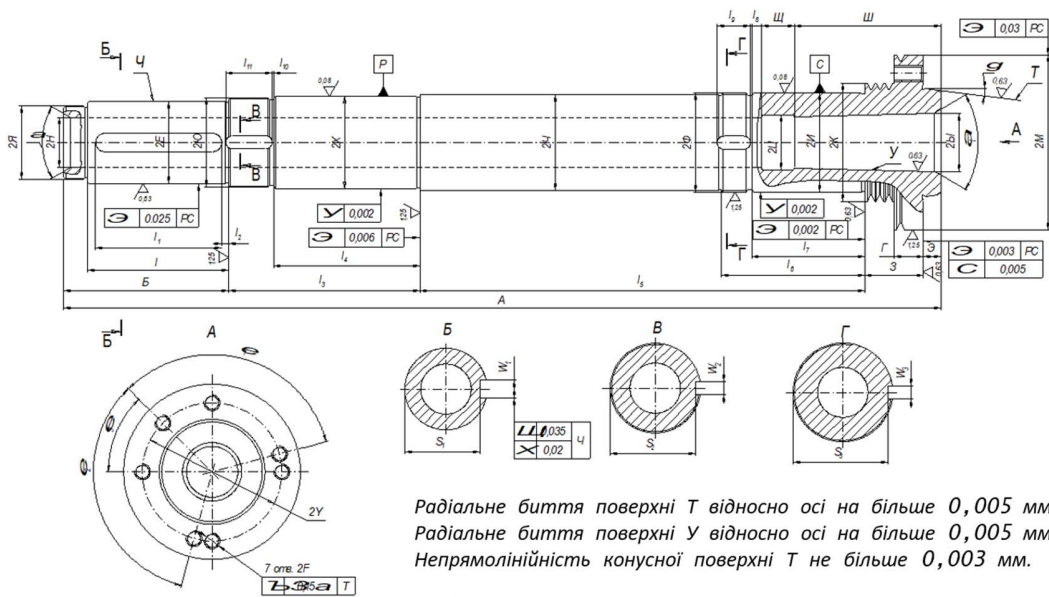


Рисунок 2.2 –Вибір баз для оброблення поверхонь

Провівши аналіз та вибравши технологічні бази за операціями технологічного процесу зводимо їх в таблицю 2.2.

Таблиця 2.2. – Технологічні бази

№ оп.	№ опорних точок	Назва технологічної бази	№ поверхні, для використання як бази
010, 080	1,2,	ДН	14
	3,4	О	5
	5 6	О	14
020	1,2,	ДН	центрові
	3,4	О	отвори
	5 6	О	1 16
030, 040(Б)	1,2,	ДН	11,14
	3,4	О	1
	5 6	О	9
040(А)	1,2,	ДН	14,11
	3,4	О	7
	5 6	О	16
050	1,2,	ДН	9,14
	3,4	О	1
	5 6	О	14
070	1,2,	ДН	34,35
	3,4	О	7
	5 6	О	16
100, 150	1,2,	ДН	11,14
	3,4	О	7
	5 6	О	9
110, 160	1,2,	ДН	34,35
	3,4	О	вершина конуса
	5 6	О	30
120, 180	1,2,	ДН	34,35
	3,4	О	вершина конуса
	5 6	О	9

130, 190	1,2, 3,4 5 6	ДН О О	11,14 1 9
170	1,2, 3,4 5 6	ДН О О	34,35 вершина конуса 9

На рисунку 2.3 показано схему базування шпинделя для операції 050 фрезерування шпонкових пазів.

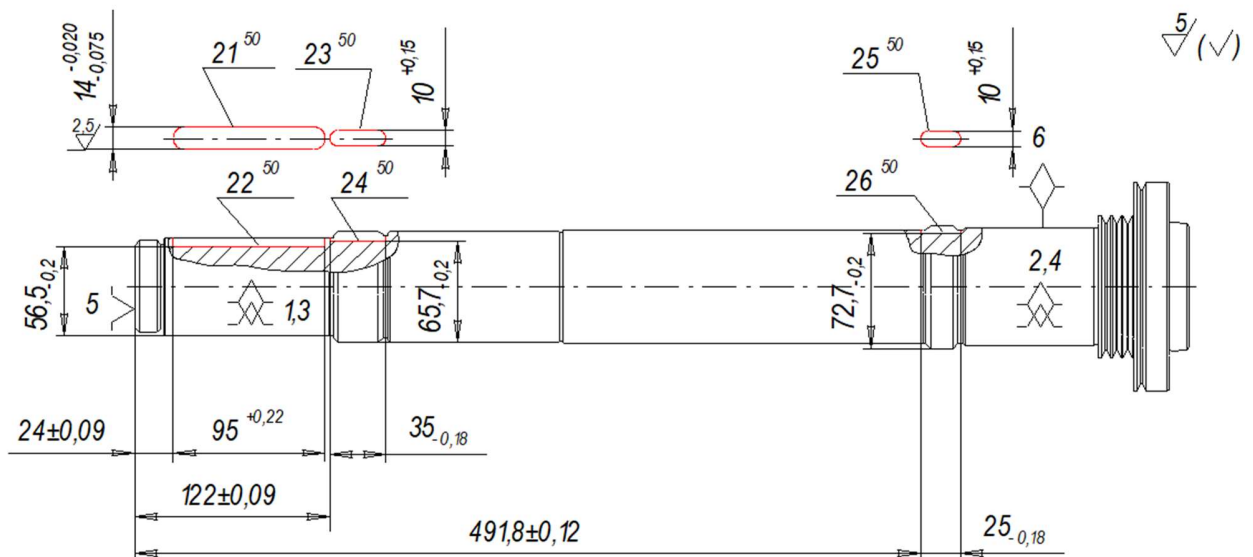


Рисунок 2.3 – Схема базування для фрезерування шпонкових пазів

2.3 Вибір засобів технічного устаткування

Для проектного (вдосконаленого нами) варіанту вибираємо інструмент універсальний, а також спеціально виготовлений для верстатів з ЧПК згідно [15]. Вибраний ріжучий інструмент зведено в таблиці 2.3. Металообробне обладнання, тобто верстати підібрані згідно [19] та вказані в таблиці 2.1 для вдосконаленого нами ТП.

Таблиця 2.3. Ріжучий інструмент для усіх операцій ТП

№ операції	Ріжучий інструмент		
	Назва	Основні розміри	Матеріал ріжучої частини
010	Фреза торцева	Ø125, z=8	T15K6
	Свердло центрувальне, тип А	Ø5	P6M5
020	Різець токарний збірний прохідний з механічним кріпленням пластинки	H×B, 20×20, φ=95	T14K8
	Різець токарний збірний копіювальний з механічним кріпленням пластинки	H×B, 20×20, φ=93	T15K6
	Різець токарний для обробки за різьбових канавок	H×B, 20×20	T14K8
	Різець токарний для обробки кутових канавок	H×B, 20×20	T14K8
	Різець фасонний	H×B, 20×20	P6M5
030	Свердло для глибокого свердління	Ø38	T15K12
040	Різець токарний збірний прохідний з механічним кріпленням пластинки	H×B, 20×20, φ=95	T14K8
	Різець розточний	L=200, Ø25 φ=95	T15K6
	Різець токарний збірний прохідний з механічним кріпленням пластинки	H×B, 20×20, φ=95	T14K8
	Різець розточний	L=200, Ø25 φ=75	T30K4
	Різець токарний збірний копіювальний з механічним кріпленням пластинки	H×B, 20×20, φ=93	T15K6
	Різець токарний для обробки кутових канавок	H×B, 20×20	T14K8
	Різець фасонний	H×B, 20×20	P6M5
	Різець розточний	L=200, Ø25 φ=95	T30K4
050	Фреза шпонкова	Ø14	BK8
	Фреза шпонкова	Ø10	P6M5
70	Різець токарний прохідний	H×B, 20×20, φ=93	T15K6
	Різець токарний різьбовий з механічним кріпленням пластинки	H×B, 20×20, φ=60	T15K6
80	Свердло спіральне ступінчасте спеціальне	Ø9,5	P6M5
	Зенкер	Ø10,2	P6M5
	Мітчик машинний	M12×1,25	P6M5
100, 150	Головки шліфувальні	ГК 32×50×6	25A20PC2K1
110	Шліфувальний круг	ПВК, 500×50×203	23A40C2K8
120	Шліфувальний круг	ЗП, 500×32×203	91A25CM27B5
130	Шліфувальний круг	ПВ, 32×63×16	25A25C1K8
160	Шліфувальний круг	ПВК, 500×50×32	25A25CM2K8
170	Бруски	БКВ, 20×80	63CM20K
180	Шліфувальний круг	ПВ, 500×32×203	25A20CM1K5
190	Шліфувальний круг	ПВ, 32×63×16	25A16C2K8

Як приспособлення використовуємо для операцій:

020, 040, 070 токарні з ЧПУ – патрон трьохкулачковий повідковий;

010, 050 фрезерувальні – спеціальне приспособлення на призмах;

030 свердлильна – патрон трикулачковий та люнет самоцентруючий

080, 100, 150 шліфувальні – рухомий центр, поводок спеціальний;

120, 180 торцекруглошліфувальні – спеціальні та рухомі центри;

130, 190 внутрішньошліфувальні – патрон повідковий та люнет самоцентруючий;

170 суперфінішна – патрон повідковий та обертовий центр.

Як вимірювальний інструмент використовуємо для операцій: штангенциркуль ШЦ-III-240-710-0,05, калібр-втулка конусна з індикатором, скоби індикаторні, мікрометри, калібри різьбові та скоби ричажного типу.

2.4 Розмірний аналіз технологічного процесу

На основі плану виготовлення деталі шпindelь будуємо схему для радіальних розмірів. За цією схемою складаємо наступні рівняння для замикаючих ланок:

$$[Z_9]^{20-1} = E^0 + E9^0 14^0 + E36^{10} 14^0 + E9^{20-1} 36^{10} - E^{20-1};$$

$$[Z_{14}]^{20-1} = I^0 + E36^{10} 14^0 + E14^{20-1} 36^{10} - I^{20-1};$$

$$[Z_{15}]^{20-1} = K^0 + E15^0 14^0 + E36^{10} 14^0 + E15^{20-1} 36^{10} - K^{20-1};$$

$$[Z_9]^{20-2} = E^{20-1} + E9^{20-1} 36^{10} + E9^{20-2} 36^{10} - E^{20-2};$$

$$[Z_{12}]^{20-2} = \check{C}^{20-1} + E12^{20-1} 36^{10} + E12^{20-2} 36^{10} - \check{C}^{20-2};$$

$$[Z_{14}]^{20-2} = I^{20-1} + E14^{20-1} 36^{10} + E14^{20-2} 36^{10} - I^{20-2};$$

$$[Z_{15}]^{20-2} = K^{20-1} + E15^{20-1} 36^{10} + E15^{20-2} 36^{10} - K^{20-2};$$

$$[Z_{11}]^{20-2} = X^{20-1} + E11^{20-1} 36^{10} + E11^{20-2} 36^{10} - X^{20-2};$$

$$[Z_{16}]^{40-1} = M^0 + E16^0 14^0 + E36^{10} 14^0 + E11^{20-2} 36^{10} + E16^{40-1} (11^{20} 14^{20}) - M^{40-1};$$

$$[Z_{17}]^{40-1} / \cos 7^\circ 7' 30'' = \text{Л}^0 + E17^0 14^0 + E36^{10} 14^0 + E11^{20-2} 36^{10} + E17^{40-1} (11^{20} 14^{20}) - \text{Л}^{40-1};$$

$$[Z_{16}]^{40-2} = M^{40-1} + E16^{40-1} (11^{20} 14^{20}) + E16^{40-2} (11^{20} 14^{20}) - M^{40-2};$$

$$[Z_{17}]^{40-2} / \cos 7^\circ 7' 30'' = \text{Л}^{40-1} + E17^{40-1} (11^{20} 14^{20}) + E17^{40-2} (11^{20} 14^{20}) - \text{Л}^{40-2};$$

$$[Z_{18}]^{40-2} / \cos 1^\circ 30' = -I^{40-1} - E18^{40-1} (11^{20} 14^{20}) - E18^{40-2} (11^{20} 14^{20}) + \text{Б}^{40-2};$$

$$\begin{aligned}
[Z_8]^{70} &= \mathcal{R}^{20} + E8^{20}36^{10} + E11^{20-2}36^{10} + E34^{40}(11^{20}14^{20}) + E8^{70}(34^{40}35^{40}) - \mathcal{R}^{70}; \\
[Z_{10}]^{70} &= \mathcal{I}O^{20} + E10^{20}36^{10} + E11^{20-2}36^{10} + E34^{40}(11^{20}14^{20}) + E10^{70}(34^{40}35^{40}) - \mathcal{I}O^{70}; \\
[Z_{13}]^{70} &= \Phi^{20} + E13^{20}36^{10} + E11^{20-2}36^{10} + E34^{40}(11^{20}14^{20}) + E13^{70}(34^{40}35^{40}) - \Phi^{70}; \\
[Z_9]^{110} &= E^{20-2} + E9^{20-2}36^{10} + E11^{20-2}36^{10} + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E9^{110}(34^{100}35^{100}) - \\
&E^{110}; \\
[Z_{11}]^{110} &= X^{20-2} + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E11^{110}(34^{100}35^{100}) - X^{110}; \\
[Z_{14}]^{110} &= \mathcal{I}^{20-2} + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E14^{110}(34^{100}35^{100}) - \mathcal{I}^{110}; \\
[Z_{16}]^{110} &= M^{40-2} + E16^{40-2}(11^{20}14^{20}) + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E16^{110}(34^{100}35^{100}) - M^{110}; \\
[\alpha_{16}]^{110} &= M^{110} + E16^{110}(34^{100}35^{100}) + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E16^{40-2}(11^{20}14^{20}) - M^{40-} \\
&2 + \alpha_{16}^{60}; \\
[Z_{17}]^{120/\cos 7^\circ 7' 30''} &= \mathcal{I}^{40-2} + E17^{40-2}(11^{20}14^{20}) + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + \\
&+ E17^{120}(11^{110}14^{110}) - \mathcal{I}^{120}; \\
[Z_{18}]^{130/\cos 1^\circ 30'} &= -\mathcal{B}I^{40-2} - E18^{40-2}(11^{20}14^{20}) - E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) - \\
&- E18^{130}(11^{110}14^{110}) + \mathcal{B}I^{130}; \\
[Z_9]^{160} &= E^{110} + E9^{110}(34^{100}34^{100}) + E11^{110}(34^{100}35^{100}) + E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) + \\
&+ E9^{160}(34^{150}35^{150}) - E^{160}; \\
[Z_{11}]^{160} &= X^{110} + E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) + E11^{160}(34^{150}35^{150}) - X^{160}; \\
[Z_{14}]^{160} &= \mathcal{I}^{110} + E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) + E14^{160}(34^{150}35^{150}) - \mathcal{I}^{160}; \\
[\alpha_9]^{160} &= E^{160} + E9^{160}(34^{150}35^{150}) + E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) + E11^{110}(34^{100}35^{100}) + \\
&+ E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E11^{20-2}36^{10} + E9^{20-2}36^{10} + E^{20-2} + \alpha_9^{60}; \\
[Z_{11}]^{170} &= X^{160} + E11^{170}11^{160} - X^{170}; \\
[Z_{14}]^{170} &= \mathcal{I}^{160} + E14^{170}14^{160} - \mathcal{I}^{170}; \\
[\alpha_{11}]^{170} &= \alpha_{11}^{60} - X^{20-2} + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E11^{110}(34^{100}35^{100}) + E(34^{150}35^{150}) \\
&(11^{110}14^{110}) + E11^{160}(34^{150}35^{150}) + E11^{170}11^{160} + X^{170}; \\
[\alpha_{14}]^{170} &= \alpha_{14}^{60} - \mathcal{I}^{20-2} + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E14^{110}(34^{100}35^{100}) + \\
&+ E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) + E14^{160}(34^{150}35^{150}) + E14^{170}14^{160} + \mathcal{I}^{170}; \\
[Z_{17}]^{180/\cos 7^\circ 7' 30''} &= \mathcal{I}^{120} + E17^{120}(11^{110}14^{110}) + E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) + \\
&+ E14^{160}(34^{150}35^{150}) + E14^{170}14^{160} + E17^{180}(11^{170}14^{170}) - \mathcal{I}^{180};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& [\alpha_{17}]^{180}/\cos 7^{\circ}7'30'' = \alpha_{17}^{60} - \Pi^{40-2} + E17^{40-} \\
& 2(11^{20}14^{20}) + E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) + E11^{110}(34^{100}35^{100}) + E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) + E11^{160} \\
& (34^{150}35^{150}) + E11^{170}11^{160} + E17^{180}(11^{170}14^{170}) + \Pi^{180}, \\
& [Z_{18}]^{190}/\cos 1^{\circ}30' = -I^{130} - E18^{130}(11^{110}14^{110}) - E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) - \\
& E14^{160}(34^{150}35^{150}) - E14^{170}14^{160} - E18^{190}(11^{170}14^{170}) + I^{190}, \\
& [\alpha_{18}]^{190}/\cos 1^{\circ}30' = \alpha_{18}^{60} + \Pi^{40-2} - E18^{40-2}(11^{20}14^{20}) - E(34^{100}35^{100})(11^{20}14^{20}) - \\
& - E11^{110}(34^{100}35^{100}) - E(34^{150}35^{150})(11^{110}14^{110}) - E11^{160}(34^{150}35^{150}) - E11^{170}11^{160} - \\
& E18^{190}(11^{170}14^{170}) - I^{190}.
\end{aligned}$$

2.5 Визначення припусків

Мінімальний припуск на обробку радіальних розмірів розраховуємо за такою формулою:

$$Z_{i \min} = R_{z i-1} + h_{i-1}, \text{ мм} \quad (2.4)$$

де, $R_{z i-1}$ – шорсткість обробленої поверхні отриманої на попередньому переході; h_{i-1} – дефектний шар поверхні, $R_{z i-1}$ та h_{i-1} визначаємо згідно [21]

Відповідно отримаємо:

$$\begin{aligned}
Z_{9^{20-1} \min} = Z_{14^{20-1} \min} = Z_{15^{20-1} \min} = Z_{16^{40-1} \min} = Z_{17^{40-1} \min} / \cos 7^{\circ}7'30'' = \\
= 160 + 290 = 450 \text{ мкм} = 0,45 \text{ мм};
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Z_{9^{20-2} \min} = Z_{12^{20-2} \min} = Z_{14^{20-2} \min} = Z_{15^{20-2} \min} = Z_{11^{20-2} \min} = Z_{16^{40-2} \min} = Z_{17^{40-2} \min} / \cos 7^{\circ}7'30'' = \\
Z_{18^{40-2} \min} / \cos 1^{\circ}30' = 40 + 60 = 100 \text{ мкм} = 0,1 \text{ мм};
\end{aligned}$$

$$Z_{8^{70} \min} = Z_{10^{70} \min} = Z_{13^{70} \min} = 1,2 \text{ мм};$$

$$\begin{aligned}
Z_{9^{110} \min} = Z_{11^{110} \min} = Z_{14^{110} \min} = Z_{16^{110} \min} = Z_{17^{120} \min} / \cos 7^{\circ}7'30'' = Z_{18^{130} \min} / \cos 1^{\circ}30' = \\
= 20 + 30 = 50 \text{ мкм} = 0,05 \text{ мм};
\end{aligned}$$

$$Z_{9^{160} \min} = Z_{11^{160} \min} = Z_{14^{160} \min} = 5 + 20 = 25 \text{ мкм} = 0,025 \text{ мм};$$

$$Z_{11^{170} \min} = Z_{14^{170} \min} = 2,52 + 5,48 = 8 \text{ мкм} = 0,008 \text{ мм};$$

$$Z_{17^{180} \min} / \cos 7^{\circ}7'30'' = Z_{18^{190} \min} / \cos 1^{\circ}30' = 5 + 20 = 25 \text{ мкм} = 0,025 \text{ мм}.$$

Глибину шару насичення при цементації газової визначаємо [6] та приймаємо $\alpha=1,1\pm 0,1$ мм. Поле розсіювання припусків визначаємо за формулами:

$$\omega[Z_i]=\sum_{i=1}^n |\omega A_i|, \text{ при } n \leq 3 \quad (2.5)$$

або

$$\omega[Z_i]=t\Delta \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n \xi_i^2 \cdot \lambda_i^2 \cdot \omega^2 A_i}, \text{ при } n > 3 \quad (2.6)$$

де, $t\Delta$ – коефіцієнт ризику, що характеризує ймовірність виходу відхилення заключної ланки за межі допуску. При відсотку ризику $P=0,27\%$, $t\Delta=3$

λ_i – коефіцієнт, що характеризує відповідність закону розсіювання похибки закону нормального розподілу.

Для розмірів не точніше IT9 – розподіл Гауса $\lambda_i^2=1/9$, для розмірів IT7,8 - закон Сімпсона $\lambda_i^2=1/6$, для розмірів IT5,6 – $\lambda_i^2=1/3$, для відхилень форми та розташування – закон Релея $\lambda_i^2=0,127$;

ξ_i – передатне відношення.

$$\omega[Z_9]^{20-1}=3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 2^2 + 0,127 \cdot (0,5^2 + 0,06^2 + 0,05^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,1^2} = 2,07\text{мм};$$

$$\omega[Z_{14}]^{20-1}=3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 2^2 + 0,127 \cdot (0,06^2 + 0,05^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,1^2} = 2\text{мм};$$

$$\omega[Z_{15}]^{20-1}=3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 2^2 + 0,127 \cdot (0,5^2 + 0,06^2 + 0,06^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,11^2} = 2,08\text{мм};$$

$$\omega[Z_9]^{20-2}=3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,1^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 0,13\text{мм};$$

$$\omega[Z_{12}]^{20-2}=3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,1^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 0,13\text{мм};$$

$$\omega[Z_{14}]^{20-2}=3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,1^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 0,13\text{мм};$$

$$\omega[Z_{15}]^{20-2} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,11^2 + 0,127 \cdot (0,06^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,07^2} = 0,15\text{MM};$$

$$\omega[Z_{11}]^{20-2} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,1^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 0,13\text{MM};$$

$$\omega[Z_{16}]^{40-1} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 2,25^2 + 0,127 \cdot (0,5^2 + 0,06^2 + 0,03^2 + 0,06^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 2,32\text{MM};$$

$$\omega[Z_{17}]^{40-1/\cos 70^\circ 7' 30''} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 2^2 + 0,127 \cdot (0,5^2 + 0,06^2 + 0,03^2 + 0,05^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,11^2} =$$

=2,08MM;

$$\omega[Z_{16}]^{40-2} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,125^2 + 0,127 \cdot (0,06^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,08^2} = 0,16\text{MM};$$

$$\omega[Z_{17}]^{40-2/\cos 70^\circ 7' 30''} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,11^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,07^2} = 0,14\text{MM};$$

$$\omega[Z_{18}]^{40-2/\cos 1^\circ 30'} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,08^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,05^2} = 0,11\text{MM};$$

$$\omega[Z_8]^{70} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,1^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2 + 0,02^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 0,14\text{MM};$$

$$\omega[Z_{10}]^{70} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,1^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2 + 0,02^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 0,14\text{MM};$$

$$\omega[Z_{13}]^{70} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,1^2 + 0,127 \cdot (0,05^2 + 0,03^2 + 0,02^2 + 0,03^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,06^2} = 0,14\text{MM};$$

$$\omega[Z_9]^{110} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,06^2 + 0,127 \cdot (0,03^2 + 0,03^2 + 0,01^2 + 0,02^2) + \frac{1}{6} \cdot 0,023^2} =$$

0,084MM;

$$\omega[Z_{11}]^{110} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,06^2 + 0,127 \cdot (0,01^2 + 0,01^2) + \frac{1}{6} \cdot 0,023^2} = 0,068\text{MM};$$

$$\omega[Z_{14}]^{110} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,06^2 + 0,127 \cdot (0,01^2 + 0,01^2) + \frac{1}{6} \cdot 0,023^2} = 0,068\text{MM};$$

$$\omega[Z_{16}]^{110} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,08^2 + 0,127 \cdot (0,03^2 + 0,01^2 + 0,015^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,05^2} = 0,1\text{MM};$$

$$\omega[Z_{17}]^{120}/\cos 7^{\circ}7'30'' = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,07^2 + 0,127 \cdot (0,02^2 + 0,01^2 + 0,01^2) + \frac{1}{6} \cdot 0,023^2} =$$

$$0,08\text{мм}; \quad \omega[Z_{18}]^{130}/\cos 1^{\circ}30' = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{9} \cdot 0,05^2 + 0,127 \cdot (0,03^2 + 0,01^2 + 0,008^2) + \frac{1}{9} \cdot 0,03^2} =$$

$$0,068\text{мм}; \quad \omega[Z_9]^{160} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot 0,023^2 + 0,127 \cdot (0,02^2 + 0,01^2 + 0,005^2 + 0,01^2) + \frac{1}{3} \cdot 0,0095^2} =$$

$$0,041\text{мм};$$

$$\omega[Z_{11}]^{160} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot 0,023^2 + 0,127 \cdot (0,005^2 + 0,003^2) + \frac{1}{3} \cdot 0,0095^2} = 0,033\text{мм};$$

$$\omega[Z_{14}]^{160} = 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot 0,023^2 + 0,127 \cdot (0,005^2 + 0,003^2) + \frac{1}{3} \cdot 0,0095^2} = 0,033\text{мм};$$

$$\omega[Z_{11}]^{170} = 0,0095 + 0,0005 + 0,005 = 0,015\text{мм};$$

$$\omega[Z_{14}]^{170} = 0,0095 + 0,0005 + 0,005 = 0,015\text{мм};$$

$$\omega[Z_{17}]^{180}/\cos 7^{\circ}7'30'' =$$

$$= 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot 0,023^2 + 0,127 \cdot (0,01^2 + 0,005^2 + 0,003^2 + 0,0025^2) + \frac{1}{3} \cdot 0,0065^2} = 0,033\text{мм};$$

$$\omega[Z_{18}]^{190}/\cos 1^{\circ}30' =$$

$$= 3 \cdot \sqrt{\frac{1}{6} \cdot 0,03^2 + 0,127 \cdot (0,008^2 + 0,005^2 + 0,003^2 + 0,0025^2) + \frac{1}{6} \cdot 0,0125^2} = 0,041\text{мм}.$$

Визначаємо максимальні значення припусків за формулою:

$$Z_{\max} = Z_{\min} + \omega[Z_i], \text{ мм} \quad (2.7.)$$

$$Z_9^{20-1}_{\max} = 0,45 + 2,07 = 2,52\text{мм};$$

$$Z_{14}^{20-1}_{\max} = 0,45 + 2 = 2,45\text{мм};$$

$$Z_{15}^{20-1}_{\max} = 0,45 + 2,08 = 2,53\text{мм};$$

$$Z_9^{20-2}_{\max} = Z_{11}^{20-2}_{\max} = Z_{12}^{20-2}_{\max} = Z_{14}^{20-2}_{\max} = 0,1 + 0,13 = 0,23\text{мм};$$

$$Z_{15}^{20-2}_{\max} = 0,1 + 0,15 = 0,25\text{мм};$$

$$Z_{16}^{40-1}_{\max} = 0,45 + 2,32 = 2,77\text{мм};$$

$$Z_{17}^{40-1}_{\max}/\cos 7^{\circ}7'30'' = 0,45 + 2,08 = 2,53\text{мм};$$

$$Z_{16}^{40-2}_{\max} = 0,1 + 0,16 = 0,26\text{мм};$$

$$Z_{17}^{40-2} \max / \cos 7^{\circ} 7' 30'' = 0,1 + 0,14 = 0,24 \text{ мм};$$

$$Z_{18}^{40-2} \max / \cos 1^{\circ} 30' = 0,1 + 0,11 = 0,21 \text{ мм};$$

$$Z_8^{70} \max = Z_{10}^{70} \max = Z_{13}^{70} \max = 1,2 + 0,14 = 1,34 \text{ мм};$$

$$Z_9^{110} \max = 0,05 + 0,084 = 0,134 \text{ мм};$$

$$Z_{11}^{110} \max = Z_{14}^{110} \max = 0,05 + 0,068 = 0,118 \text{ мм};$$

$$Z_{16}^{110} \max = 0,05 + 0,1 = 0,15 \text{ мм};$$

$$Z_{17}^{120} \max / \cos 7^{\circ} 7' 30'' = 0,05 + 0,08 = 0,13 \text{ мм};$$

$$Z_{18}^{130} \max / \cos 1^{\circ} 30' = 0,05 + 0,068 = 0,108 \text{ мм};$$

$$Z_9^{160} \max = 0,025 + 0,041 = 0,066 \text{ мм};$$

$$Z_{11}^{160} \max = Z_{14}^{160} \max = 0,025 + 0,033 = 0,058 \text{ мм};$$

$$Z_{11}^{170} \max = Z_{14}^{170} \max = 0,008 + 0,015 = 0,023 \text{ мм};$$

$$Z_{17}^{180} \max / \cos 7^{\circ} 7' 30'' = 0,025 + 0,033 = 0,058 \text{ мм};$$

$$Z_{18}^{190} \max / \cos 1^{\circ} 30' = 0,025 + 0,041 = 0,066 \text{ мм}.$$

Далі визначаємо середні значення припусків за формулою:

$$Z_{\text{ср}} = Z_{\text{min}} + \omega[Z_i]/2, \text{ мм} \quad (2.8)$$

$$Z_9^{20-1} \text{ ср} = 0,45 + 2,07/2 = 1,485 \text{ мм};$$

$$Z_{14}^{20-1} \text{ ср} = 0,45 + 2/2 = 1,45 \text{ мм};$$

$$Z_{15}^{20-1} \text{ ср} = 0,45 + 2,08/2 = 1,49 \text{ мм};$$

$$Z_9^{20-2} \text{ ср} = Z_{11}^{20-2} \text{ ср} = Z_{12}^{20-2} \text{ ср} = Z_{14}^{20-2} \text{ ср} = 0,1 + 0,13/2 = 0,165 \text{ мм};$$

$$Z_{15}^{20-2} \text{ ср} = 0,1 + 0,15/2 = 0,175 \text{ мм};$$

$$Z_{16}^{40-1} \text{ ср} = 0,45 + 2,32/2 = 1,61 \text{ мм};$$

$$Z_{17}^{40-1} \text{ ср} / \cos 7^{\circ} 7' 30'' = 0,45 + 2,08/2 = 1,49 \text{ мм};$$

$$Z_{16}^{40-2} \text{ ср} = 0,1 + 0,16/2 = 0,18 \text{ мм};$$

$$Z_{17}^{40-2} \text{ ср} / \cos 7^{\circ} 7' 30'' = 0,1 + 0,14/2 = 0,17 \text{ мм};$$

$$Z_{18}^{40-2} \text{ ср} / \cos 1^{\circ} 30' = 0,1 + 0,11/2 = 0,155 \text{ мм};$$

$$Z_8^{70} \text{ ср} = Z_{10}^{70} \text{ ср} = Z_{13}^{70} \text{ ср} = 1,2 + 0,14/2 = 1,27 \text{ мм};$$

$$Z_9^{110} \text{ ср} = 0,05 + 0,084/2 = 0,092 \text{ мм};$$

$$Z_{11}^{110} \text{ ср} = Z_{14}^{110} \text{ ср} = 0,05 + 0,068/2 = 0,084 \text{ мм};$$

$$Z_{16}^{110} \text{cp} = 0,05 + 0,01/2 = 0,1 \text{ мм};$$

$$Z_{17}^{120} \text{cp} / \cos 7^\circ 7' 30'' = 0,05 + 0,08/2 = 0,09 \text{ мм};$$

$$Z_{18}^{130} \text{cp} / \cos 1^\circ 30' = 0,05 + 0,068/2 = 0,084 \text{ мм};$$

$$Z_9^{160} \text{cp} = 0,025 + 0,041/2 = 0,0455 \text{ мм};$$

$$Z_{11}^{160} \text{cp} = Z_{14}^{160} \text{cp} = 0,025 + 0,033/2 = 0,0415 \text{ мм};$$

$$Z_{11}^{170} \text{cp} = Z_{14}^{170} \text{cp} = 0,008 + 0,015/2 = 0,0155 \text{ мм};$$

$$Z_{17}^{180} \text{cp} / \cos 7^\circ 7' 30'' = 0,025 + 0,033/2 = 0,0415 \text{ мм};$$

$$Z_{18}^{190} \text{cp} / \cos 1^\circ 30' = 0,025 + 0,041/2 = 0,0455 \text{ мм}.$$

2.6 Розрахунок режимів різання

На внутрішньошліфувальному верстаті СШ-37 (операція 190) проводиться остаточне шліфування отвору під конус Морзе 5, $D_{\max} = 44,399 (+0,025)$ мм. Припуск під шліфування $Z = 0,132$ мм, матеріал заготовки 12ХН3А, твердість 59 ... 63 HRC, шорсткість після обробки $Ra = 0,63$ мкм. Шліфувальний круг: ПВ 32х63х13 25А16С2К8.

Згідно [7] приймаємо:

Глибина різання $t = 0,0025$ мм

Поздовжня подача в частках від ширини круга:

$$S_{\text{пр}} = 0,25 \dots 0,4,$$

Вибираємо $S_{\text{пр}} = 0,3$.

Поперечна подача – $S_{\text{поп}} = t = 0,0025$ мм/дв.х.

Період стійкості круга, хв приймаємо $T = 10$ хв.

Розраховуємо швидкість обертання оброблюваної деталі, м/хв

$$V_d = \frac{C \cdot D_{\text{отв}}^p}{T^m \cdot t^x \cdot S^y}, \text{ м/хв} \quad (2.9)$$

де, $D_{\text{отв}}$ – діаметр отвору, мм;

t – глибина різання, мм;

S – поздовжня подача, яка залежить від ширини круга;

C – коефіцієнт, що враховує умови обробки;

ρ, m, x, y – показники ступеня;

T – період стійкості круга.

Згідно табличних даних $C = 0,05, \rho = 0,5, m = 0,6, x = 0,9, y = 0,9$

$$V_d = \frac{0,05 \cdot 44,399^{0,5}}{10^{0,6} \cdot 0,0025^{0,9} \cdot 0,3^{0,9}} = 54,3 \text{ м/хв}$$

Визначаємо частоту обертання деталі, хв^{-1}

$$n_d = \frac{1000 V_d}{\pi \cdot D_{\text{отв}}}, \text{ хв}^{-1} \quad (2.10)$$

$$n_d = \frac{1000 \cdot 54,3}{3,14 \cdot 44,399} = 389 \text{ хв}^{-1}$$

Приймаємо $n = 390 \text{ хв}^{-1}$, так як на внутрішньошліфувальному верстаті СШ-37 безступінчасте регулювання частоти обертання деталі в межах $50 \dots 1000 \text{ хв}^{-1}$.

Визначаємо частоту обертання шліфувального кола при прийнятій швидкості:

$$n_{\text{кр}} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot V_{\text{кр}}}{\pi \cdot D_{\text{кр}}} \text{ хв}^{-1} \quad (2.11)$$

де, $D_{\text{к}}$ – діаметр круга, мм;

$$n_{\text{кр}} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot (30 \dots 35)}{3,14 \cdot 32} = 17914 \dots 20990 \text{ хв}^{-1}$$

По паспорту верстату приймаємо $n = 20000 \text{ хв}^{-1}$.

Розраховуємо швидкість обертання круга, м/хв

$$V_{\text{кр}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{кр}} \cdot n}{1000 \cdot 60}, \text{ м/хв} \quad (2.12)$$

$$V_{\text{кр}} = \frac{3,14 \cdot 32 \cdot 20000}{1000 \cdot 60} = 33,5 \text{ м/хв}$$

Вибір режимів різання табличним методом проводимо за [10, 13, 17]. Вихідними даними є: припуск, що знімається; оброблюваний матеріал; схема та умови обробки; паспортні дані верстата.

Розрахунки зводимо до таблиць та переносимо їх в додаток А до роботи.

2.7 Нормування технологічних операцій

Нормування проводимо виходячи з розрахованого основного (машинного) часу цієї операції. У серійному виробництві визначають норму штучно-калькуляційного часу:

$$T_{ш-к} = \frac{T_{п.з}}{n} + T_{шт}, \text{ хв} \quad (2.13)$$

де, $T_{п.з}$ – підготовчо-заключний час на налагодження, встановлення та налаштування пристроїв, отримання інструменту.

n – кількість деталей у партії, що запускається, приймаємо $n=250$ шт.

$T_{шт}$ – норма штучного часу:

$$T_{шт} = T_o + T_{доп} + T_{об} + T_{відп}, \text{ хв} \quad (2.14)$$

де, T_o – основний час на операцію;

$T_{доп}$ – допоміжний час:

$$T_v = (T_{усг} + T_{з.о} + T_{упр} + T_{вим}), \text{ хв} \quad (2.15)$$

де, $T_{ус}$ – час на встановлення та зняття заготовки;

$T_{з.о}$ – час на закріплення та відкріплення заготовки;

$T_{упр}$ – час на прийоми управління;

$T_{вим}$ – час на вимірювання деталі;

$T_{об}$ – час на обслуговування (враховується на шліфувальних операціях):

$$T_{об} = T_{тех} + T_{орг}, \text{ хв} \quad (2.16)$$

де, $T_{тех}$ – час на технічне обслуговування;

$T_{\text{орг}}$ – час на організаційне обслуговування робочого місця;

$T_{\text{відп}}$ – час на відпочинок, вибирається у % від оперативного часу $T_{\text{оп}}$

$$T_{\text{оп}} = T_o + T_v, \text{ хв} \quad (2.17)$$

Розрахунок технічних норм часу за операціями зводимо до таблиць та переносимо їх в додаток А до роботи.

РОЗДІЛ 3

ВДОСКОНАЛЕННЯ ОПЕРАЦІЙ НА БАЗІ ІНОВАЦІЙНИХ НАУКОВИХ
ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Дослідження та вдосконалення методів шліфування поверхонь шпинделя токарного верстату

Типові операції шліфування деталі типу шпиндель мають низку недоліків, оскільки не враховують певних особливостей обробки даної конкретної деталі, а також останні досягнення науки і практики машинобудування [1, 2, 9]. З метою підвищення ефективності шліфувальних операцій ТП (технологічного процесу) обробки деталі шпиндель проведемо огляд різних способів досягнення цього з вирішенням наступних завдань:

- удосконалення методу обробки;
- удосконалення різального інструменту.

На основі вирішення цих завдань спроекуємо удосконалену шліфувальну операцію. Одним із недоліків шліфувальної операції є низька стійкість круга проти засалювання, велика витрата абразиву на правку та висока вартість правлячого інструменту, що загалом є причиною збільшення собівартості операції шліфування.

Зношення абразивних кругів призводить до зниження якості шліфованої поверхні та точності обробки, через що необхідна періодична правка. При звичайному абразивному шліфуванні витрати часу та витрата абразиву, пов'язані з правкою круга, сягають 60–70 % усіх витрат на операцію обробки, а в деяких випадках – до 90–95 %. Таким чином, підвищення стійкості абразивного круга – ефективний фактор підвищення продуктивності праці та зниження собівартості операції шліфування.

Для усунення цього недоліку скористаємося будь-яким фізичним ефектом або явищем, яке б запобігло процесу засалювання круга [18].

Одним з таких способів є накладення змінного магнітного поля на процес шліфування. Проведені випробування [24] показали, що при накладенні змінного магнітного поля відбувається підвищення стійкості абразивних кругів у 2-3 рази, що пояснюється зменшенням міцності шліфуючого матеріалу в змінному магнітному полі. Зменшення міцності сталей при динамічному впливі на них змінним магнітним полем обумовлено рухливістю дислокацій. При зазначеному способі шліфування має місце комбінований механічний, магнітний, електропластичний, тепловий та вібраційний вплив на оброблюваний матеріал.

Суть електропластичного впливу [9] полягає у підвищенні рухливості дислокацій під дією електронів провідності та обумовлена індукованими в заготовці вихровими струмами, щільність яких визначається за формулою:

$$j = \frac{\sqrt{2}}{a} \cdot H \cdot \sqrt{[\operatorname{ch}(2x/a) - \cos(2x/a)] / [\operatorname{ch}(2b/a) + \cos(2b/a)]}, \quad (3.1)$$

де, $a = 5300 \sqrt{\rho / \mu f}$ – глибина скін-шару;

ρ – питома проникність;

μ – магнітна проникність;

f – частота;

b – ширина зразка;

H – напруженість магнітного поля.

При роботі у змінних магнітних полях насичення ($H = 360$ кА/м) густина струму лежить на поверхні зразка досягне оптимальної, з погляду теорії електропластичного ефекту [12], величини $10^4 - 10^5$ кА/, що може бути поясненням підвищення ефективності шліфування в змінному магнітному полі з підвищенням його напруження.

Відповідно до теорії дислокацій фізики, твердість тіла механізмом деформації служить те чи інше переміщення різного роду дислокацій, що мають електричний заряд і взаємодіють між собою, а також із включеннями та домішковими атомами,

які теж можуть мати певний заряд. Форменні стадії еволюції дислокацій у процесі пластичної деформації та руйнування безпосередньо пов'язані із зародженням нових дислокацій, їх рухом, взаємодією на перешкодах – стопорах. В області низьких швидкостей руху дислокацій, напруга пластичного течії визначається взаємодією їх із перешкодами (включення, домішкові атоми та ін.), а області більш високих швидкостей – взаємодією рухомих дислокацій з кристалічною решіткою.

Дослідження [10, 17] показали, що накладання переміщеного магнітного поля при шліфуванні призводить до зниження шорсткості на 30-90%. Ще одним із недоліків процесу шліфування є висока температура у зоні шліфування. Теплові явища під час шліфування погіршують фізико-хімічний стан поверхневого шару, які знижує працездатність деталей. Охолодження деталі в цілому не знижує істотно температуру в зоні контакту з абразивним кругом, тому структурні перетворення все ж таки відбуваються.

Концентрація тепла в зоні обробки залежить від інтенсивності теплоутворення та від інтенсивності тепловідведення [26, 27]. Для зменшення інтенсивності теплоутворення необхідно зменшити швидкість різання та сили різання, а це не зовсім прийнятно, оскільки пов'язано зі втратою продуктивності та збільшенням шорсткості обробленої поверхні. Інтенсивність тепловідведення визначається здатністю мастильно-охолоджуючої рідини (МОР) відводити тепло із зони різання. Тепловідвідна здатність МОР залежать від теплопровідності та теплоємності самої МОР, швидкості та тиску її подачі у зону контакту. Отже, для вирішення цієї проблеми пропонуємо використовувати мастильно-охолоджуючий технологічний засіб (МОТЗ) – водяна пара [21]. У цьому процесі підвищена температура не є «абсолютним злом» і може бути позитивним фактором, сприяючи швидшій дифузії та швидшому встановленню адсорбційної рівноваги в граничному мастильному шарі.

Потік пари, що підводиться від парогенератора до зони різання, являє собою турбулентний потік двофазної суміші: пару і зважених крапель конденсату.

Охолоджуючий ефект МОТЗ не зводиться до явища суто конвективного теплоперенесення, а включає опосередковане охолодження, обумовлене мастильним ефектом. Відомо, що мастильна дія МОТЗ відбувається шляхом проникнення мастильного матеріалу на межу контакту стружка-інструмент через динамічну мережу міжповерхневих капілярів. Для реалізації мастильної дії МОТЗ в умовах різання необхідно, щоб час перебігу стадій процесу не перевищувало у часі існування самого капіляра, яке лімітується швидкістю сходу стружки.

Таким чином, при порівнянні отриманих результатів [26] у разі парового МОТЗ в порівнянні з МОРО того ж хімічного складу забезпечується резерв часу для формування мастильних адсорбційних плівок на стінках капіляра.

Графік залежності зношення інструменту від способу охолодження наведено на рисунку 3.1. Таким чином, ефективність пароподібних МОТЗ пояснюється підвищенням їх мастильної дії внаслідок посилення проникаючої здатності та виключення стадії рідкофазного проникнення.

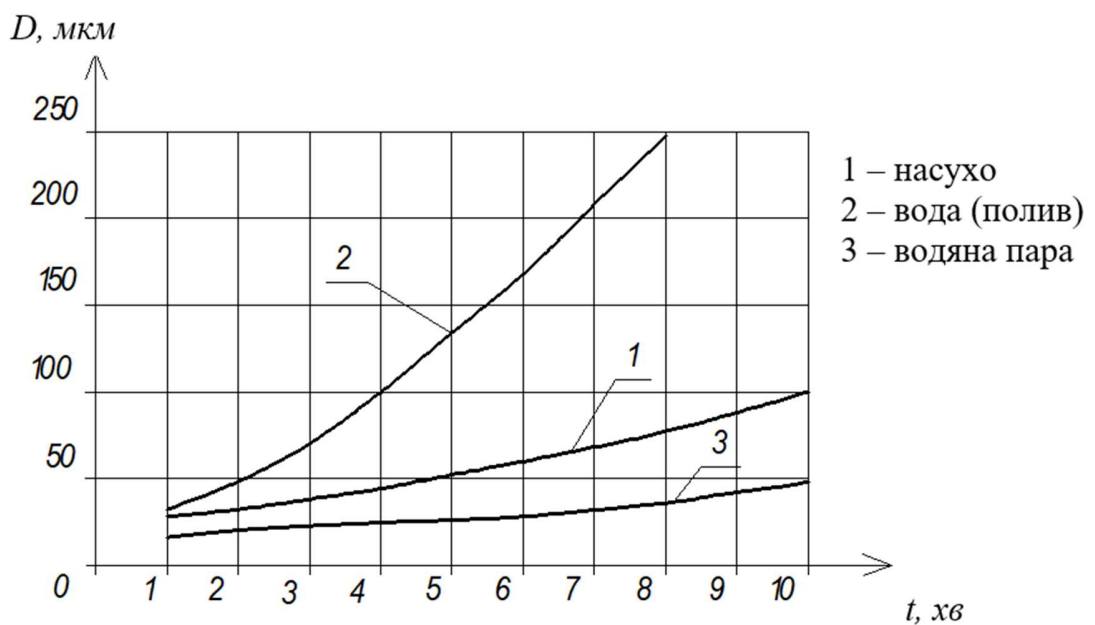


Рисунок 3.1 – Залежність зношення інструменту Δ від способу охолодження та часу τ

Пароподібні МОТЗ у порівнянні з рідкими забезпечують більш рівномірне охолодження, що сприятливо впливає на процес шліфування та процес різання в цілому. Застосування МОТЗ у пароподібному стані дозволяє також підвищити стійкість інструменту.

3.2 Вдосконалення та проектування ріжучого інструменту

Для підвищення стійкості абразивного круга, покращення якості обробленої поверхні та в цілому підвищення продуктивності та зниження собівартості операції шліфування застосуємо імпрегнований шліфувальний круг (просочений). Склад для імпрегнування шліфувального круга на керамічній зв'язці включає поверхнево-активні речовини, хімічно активні речовини і розчинник [17]. Для удосконалення технології обробки імпрегнованими кругами пропонується спосіб контактної ерозійної вибіркової шліфування (КЕВШ). При цьому спосіб одночасно з механічною обробкою відбувається впровадження поверхневий шар заготовки частинок іншого матеріалу, що дозволяє отримати оброблені поверхні з необхідними експлуатаційними характеристиками [21].

Спосіб КЕВШ заснований на використанні низки наукових положень та технічних рішень мікрорізання в електромагнітному режимі; вибіркового перенесення області контакту поверхонь деталей; позазонного способу охолодження та очищення шліфувального круга.

При КЕВШ на відміну від шліфування стандартними та імпрегнованими кругами теплота виділяється в зоні шліфування вибірково і саме в тих місцях, де дефектність (або щільність дислокацій) вища, ніж у середньому за об'єму. В результаті цього утворюються мікроділянки з високою температурою (у тисячі разів більшою, ніж на сусідніх мікроділянках), на яких великі карбіди заміщаються дрібними і до того ж займають певне місце, крім того дрібні карбіди з'єднуються з металевою решіткою за правилами послідовності когерентного зв'язку, яка не руйнує, а навпаки укріплює та зміцнює. Таким чином, при КЕВШ оброблена

поверхня отримує одночасну оболонку з особливими властивостями. При цьому поверхневий шар є зміцнюючим каркасом, що перешкоджає появі мікротріщин.

При КЕВШ використовують такі імпрегновані круги: круг, просочений органічними та неорганічними імпрегнаторами; круг із напиленими частинками металу; круг з імпрегнатором, нанесеним на периферію у процесі обробки; круг з імпрегнатором, внесеним у процесі виготовлення круга. Круг для КЕВШ може бути здійснений у трьох режимах: звичайному та у двох режимах з підведенням напруги (анод – заготовка, катод – напилений шар імпрегнатора (міді) на шліфувальному крузі та навпаки). В останньому режимі частинки металу (міді) переносяться на оброблювану поверхню як в результаті механічного та теплового впливу в зоні різання, так і завдяки односпрямованості поверхневих потенціалів оброблюваного та напиленого матеріалі. Поверхні, оброблені в цьому режимі, менш схильні до утворення нерівностей у процесі контактування тіл під навантаженням.

Залежності шорсткості R_a обробленої поверхні (а) і складових P_y (б) та P_z (в) сили різання від тривалості шліфування τ стандартним кругом 24A25CM112K5 (криві 1), кругом імпрегнований кристалічною сіркою (криві 2), кругом, де напилений шар – катод) (криві 3), і те ж (заготовкою – катод, напилений шар – анод) (криві 4) представлені на рисунку 3.2. Два перші способи – звичайне шліфування; два останні – КЕВШ.

Дослідження показали, що використання КЕВШ дозволяє підвищити ефективність шліфування у 2-4 рази, стійкість круга до 4,5 разів, знизити шорсткість обробленої поверхні, покращити якість поверхневого шару оброблених деталей, зменшити концентрацію пилу та газів у зоні обслуговування у кілька разів.

Температурне поле деталі при різанні швидко прагне стану теплового насичення; процес встановлюється і температура поверхні не змінюється. Температурне поле деталі у даному випадку прийнято називати квазістаціонарним. Такий стан настає хоч і швидко, але не миттєво.

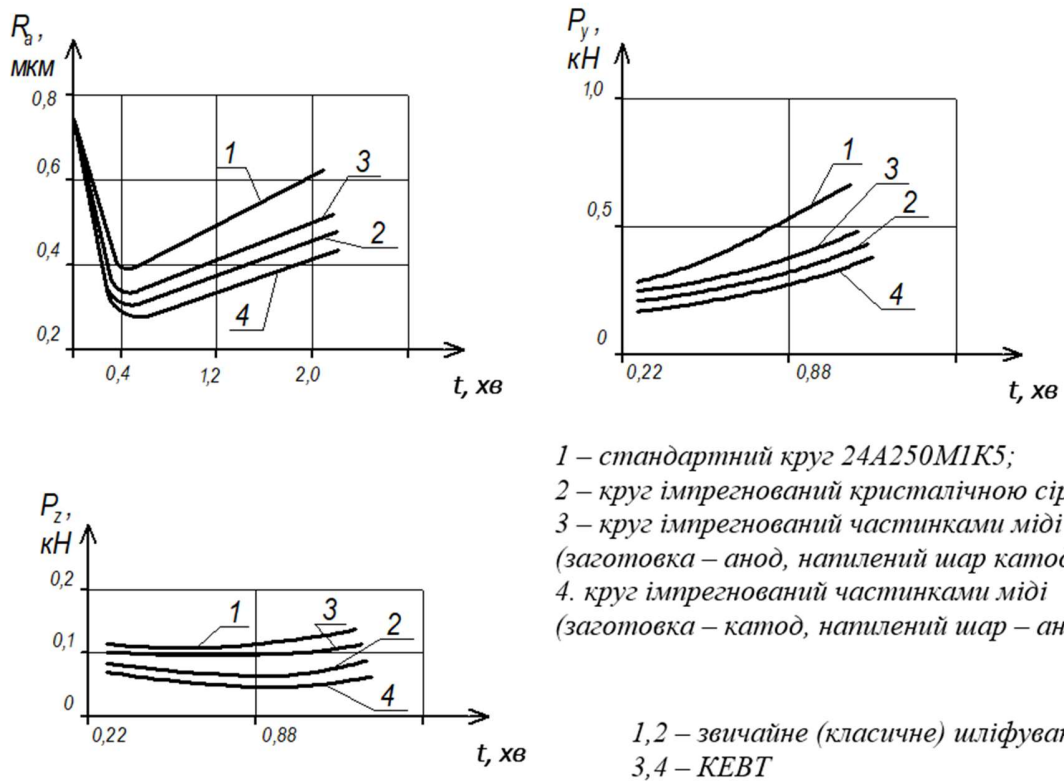


Рисунок 3.2 – Залежність шорсткості обробленої поверхні від часу шліфування із застосуванням різних кругів і способів

У початковий період температура підвищується на ділянці АВ, що показано на рисунку 3.3 (період насичення), а потім стає постійною (при цьому не враховуються коливання, викликані періодичним порушенням контакту).

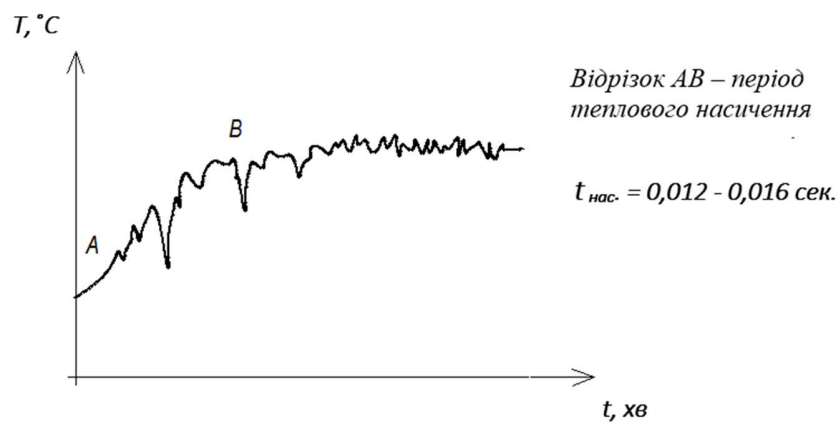


Рисунок 3.3 – Осцилограма зміни температури поверхні при шліфуванні суцільним кругом

Час теплового насичення приблизно 0,012-0,016 сек. Якщо тривалість шліфування менше часу теплового насичення, температура поверхні не досягає максимального значення, при якому утворюється припалі і погіршуються властивості обробленої поверхні. Для усунення цього недоліку зробимо процес шліфування переривчастим. Реалізувати цю пропозицію можна, зробивши робочу поверхню круга переривчастою, виконавши на ній пази. При цьому постає питання про форму пазів, їх кількості та розміри. Якщо виконати пази паралельними твірної круга, то круг працюватиме з ударами. Виникає нове протиріччя: робоча поверхня круга має бути переривчастою, щоб уникнути припалів, і поверхня круга має бути безперервною, щоб уникнути ударів. Для цього розділимо об'єкт на частини, що виконують різні функції.

Нехай круг вцілому, виконуючи шліфування, здійснює постійний контакт із заготовкою, яку робоча поверхню у кожному перерізі забезпечує переривчастість шліфування. Щоб поверхня круга загалом була безперервною, пази виконуємо похилими (рисунок 3.4.). Коли в одному перерізі в контакті з заготовкою знаходиться ріжучий виступ, в іншому перерізі в цей час над поверхнею, що шліфується, знаходиться паз. В результаті круг працюватиме без ударів.

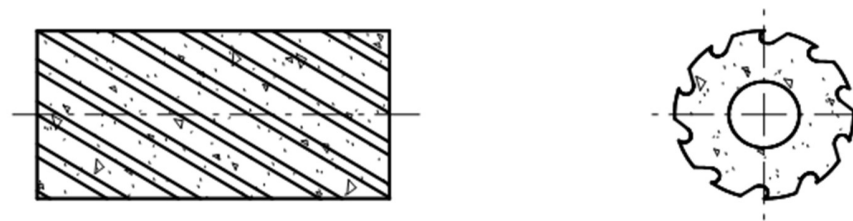


Рисунок 3.4 – Переривчастий шліфувальний круг

Таким чином, при переривчастому шліфуванні кожна точка поверхні шліфується декількома ріжучими виступами. Температура поверхні в проміжках між різанням не встигає знизитися до вихідної, а зменшується лише на 20-25%. Шліфування наступними різальними виступами круга істотно не підвищує

температуру в зоні різання, так як товщина шару, що знімається зменшується, знижуючи інтенсивність теплового джерела.

Були проведені також досліді щодо продуктивності переривчастого шліфування [18]. В результаті цих досліджень встановлено, що при тому самому показанні ноніуса верстата істинний об'єм переривчастим кругом навіть дещо більше, ніж суцільним кругом. Пояснюється це тим, що при шліфуванні суцільним кругом віджимання шпинделя виходить більшим, ніж при шліфуванні переривчастим кругом. Відомо також, що при шліфуванні в корисній роботі беруть участь далеко не всі ріжучі крайки, тому збереження продуктивності при переривчастому шліфуванні можна пояснити більш рівномірним розподілом корисного навантаження на зерна круга, які залишилися. Крім того, зменшується засалюваність переривчастого круга та кількість його правок. Переривчасте шліфування дозволяє використовувати форсовані режими роботи. Також форма зерен суттєво впливає на властивості шліфувальних кругів. Дана характеристика дозволяє більш точно ідентифікувати властивості шліфувального інструменту та ефективніше використовувати його.

Для вдосконаленої операції 120 Торцекруглошліфувальної пропонується використовувати різальний інструмент – шліфувальний круг форми ЗП з похилими пазами на поверхні. Шліфувальний круг імпрегнують складом, описаним у попередньому підпункті. Правка круга здійснюється алмазом на оправці.

Також ми удосконалили свердло для глибокого свердління. Воно призначене для чистового оброблення осьового отвору деталі шпиндель. Свердло, представлене на рисунку 3.5 складається з корпусу 1 з хвостовиком 2 і внутрішнім каналом 3 для відведення стружки разом з МОР, напрямних шпонок 4 і 5, 6 центрального і периферійного 7 змінних різців. Центральний різець 6 встановлений на 0,5 ... 0,7 мм ближче до торця хвостовика 2, ніж периферійний різець 7. Напрямна шпонка 5 встановлена навпроти периферійного різця, а напрямна шпонка 4 встановлена під центральним кутом 90° до направляючої шпонки 5. В осьовому

напрямку шпонки 4 і 5 зміщені щодо периферійного різця у бік хвостовика на $l = 3 \dots 5$ мм.

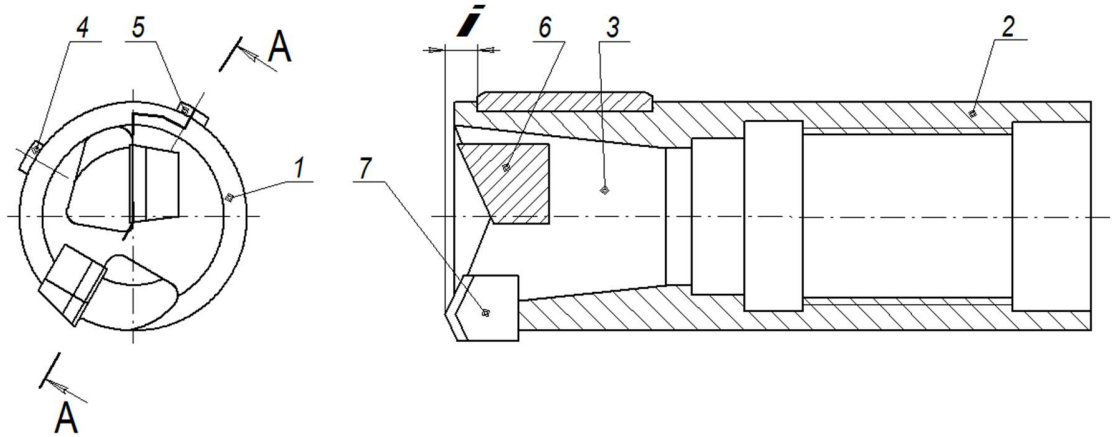


Рисунок 3.5 – Спроектоване свердло для глибокого свердління

Свердло працює в такий спосіб. При свердлінні першим в заготовку врізається периферійний різець 7, утворюючи в ній кільцеву канавку, а центральний різець 6 підрізає стрижень, що утворюється. При цьому сили різання притискають напрямні шпонки 4 і 5 стінок обробленої ділянки отвору. Рівнодіюча радіальних і тангенціальних складових сил різання при такому розташуванні різців і направляючих шпонок спрямована через поверхню контакту направляючих шпонок з отвором і момент відтискання осі не створюється. Стружка, що утворюється при свердлінні, відводиться через канал 3.

Свердло складається з двох основних елементів – головки та державки. Головку виконують з матеріалу 38ХНЗМФА з припайними пластинами, матеріал ВК10-ОМ з двома канавками під твердосплавні напрямні елементи і внутрішнім отвором для відведення МОР. Державку свердла виготовляється з труби високої точності із сталі 08Х18Н10Т. Зовнішній діаметр державки приймаємо $D = 35$ мм. Внутрішній діаметр приймаємо $d = 21$ мм. Державка з'єднується з головкою за допомогою низькопрофільного прямокутного різьблення з кутом підйому 120° .

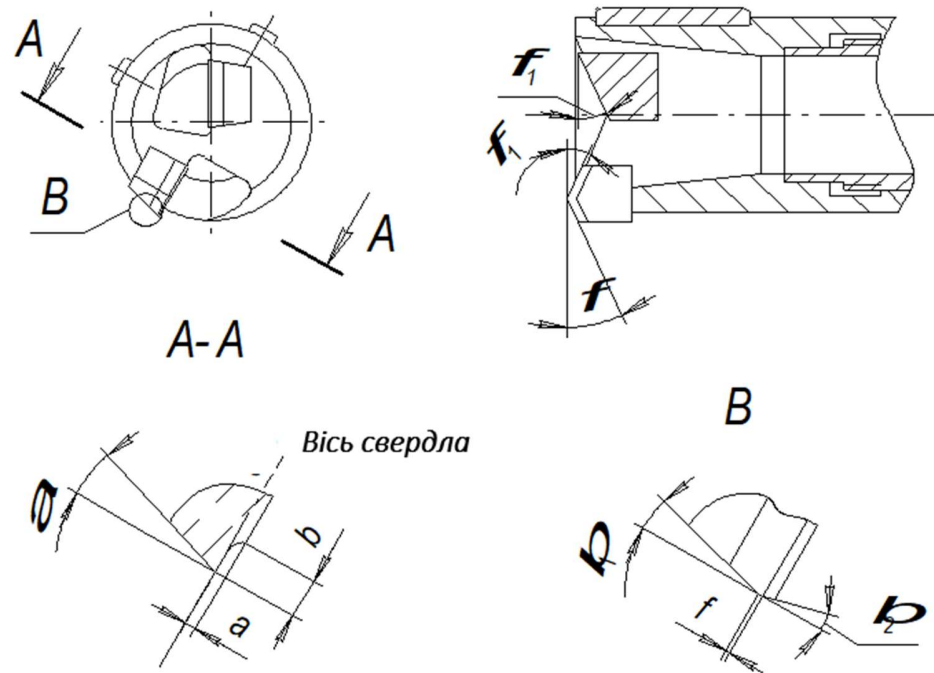


Рисунок 3.6 –Геометричні параметри різальних крайок свердла для глибокого свердління

Значення параметрів заточування вибираємо по [12]:

Головний кут у плані $\varphi = 25^\circ$;

Кут $\varphi_1 = 25^\circ$;

Розмір $a = 0,5$ мм;

Розмір $b = 1,8$ мм;

Стрічка $f=0,6$ мм;

Задній кут $\alpha = 18^\circ$;

кути $\beta_1 = \beta_2 = 15^\circ$;

3.3 Моделювання деформацій шпинделя токарного верстату

Визначення силових та експлуатаційних параметрів шпинделя базується на аналізі розподілу навантажень. Врахування деформацій поверхонь дає змогу точніше оцінити жорсткість та момент головного вектора.

Алгоритм методу скінченних елементів (МКЕ) базується на використанні математичного інструментарію для формування матриць жорсткості, апроксимації поверхневих і об'ємних навантажень до вузлових зусиль [28], а також розв'язання обернених задач – визначення параметрів напружено-деформованого стану за відомими зміщеннями у спроектованому шпинделі для токарного верстата. Послідовність розрахунків за допомогою МКЕ [2, 16] виглядає так:

1. Процес починається з дискретизації об'єму деталі шляхом побудови сітки кінцевих (скінченних) елементів. У середовищі CosmosWorks об'ємні тіла апроксимуються тетраедрами, грані яких описуються лінійними або параболічними функціями координат. Для поверхневих моделей використовується розбиття на трикутні елементи: плоскі (з лінійною залежністю) або криволінійні (з параболічною);

2. Визначаємо ступенів вільності. Для просторових скінченних елементів (СЕ) ступенями вільності є лінійні переміщення вздовж осей локальної системи координат. У СЕ оболонки, окрім трьох переміщень, у кожному вузлі враховуються три кути повороту нормалі до серединної поверхні відносно тих самих осей.

3. Проводимо координатні перетворення. Встановлюються математичні залежності для трансформації вузлових переміщень і кутів повороту з локальної у глобальну систему координат.

4. Далі здійснюється формування локальних матриць жорсткості. Обчислюються матриці жорсткості СЕ. Їхні компоненти визначаються не лише координатами вузлів, а й пружними константами матеріалу (модулем пружності та коефіцієнтом Пуассона).

5. Отримані локальні матриці жорсткості трансформуються у глобальну систему координат за допомогою відповідних матриць переходу.

6. Шляхом об'єднання матриць жорсткості окремих елементів формується загальна (глобальна) матриця жорсткості системи, тобто в нашому випадку шпинделя.

7. На основі отриманих вузлових переміщень (та кутів повороту) і обраних функцій форми для кожного скінченного елемента обчислюються деформації. У лінійних елементах деформації є сталими в межах усього об'єму, тоді як у параболічних вони змінюються за лінійним законом.

8. Далі на основі деформацій розраховуються напруження. Залежно від алгоритму програми, напруження у спільних вузлах суміжних елементів можуть усереднюватися (важливий етап, що має різні програмні реалізації) з подальшою корекцією значень усередині елементів.

9. Проводимо власне сам розрахунок еквівалентних параметрів. Виходячи з компонентів напружено-деформованого стану (НДС) та фізико-механічних характеристик матеріалів, проводиться обчислення еквівалентних напружень згідно з обраним критерієм міцності.

для розрахунків у пакеті Cosmosworks задаємо значення сил, які діють на шпindel:

Сила різання $P_z = 15000 \text{ Н}$; $P_x = 3500 \text{ Н}$; $P_y = 7000 \text{ Н}$;

Крутний момент $M_{кр} = 10000 \text{ Н}$;

Вага деталі шпindel $G = 1650 \text{ Н}$

Моделювання роботи шпинделя проводилося за допомогою оригінальних програмних засобів, а також у пакетах COSMOS Works, ANSYS.

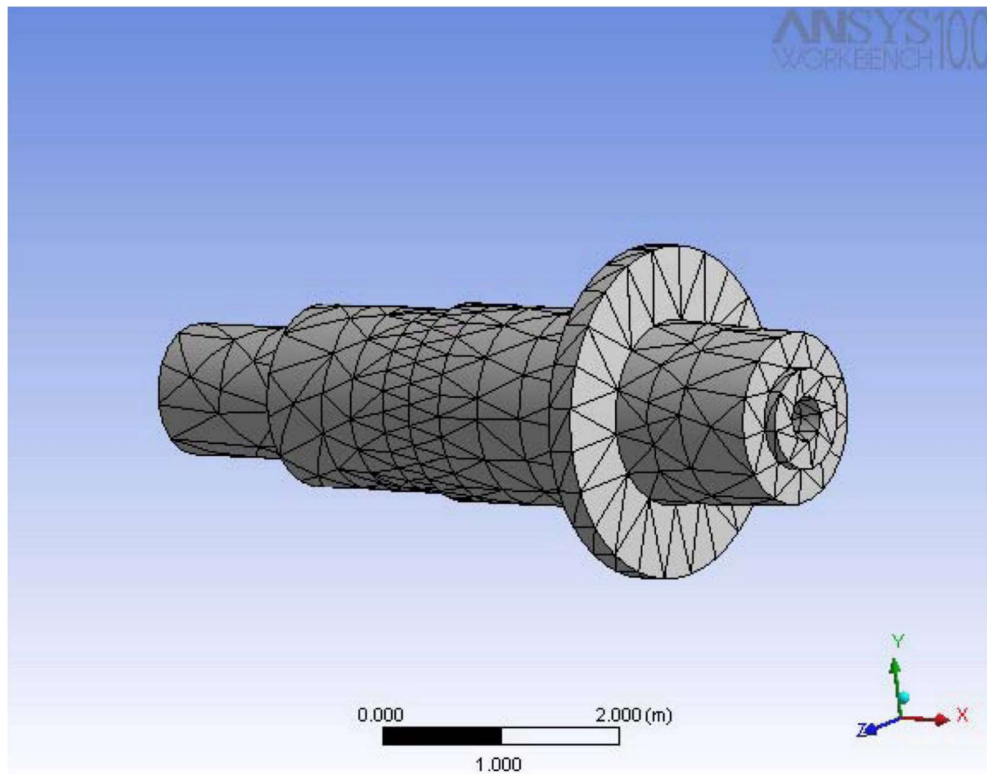


Рисунок 3.7 – Побудована сітка кінцевих елементів шпинделя

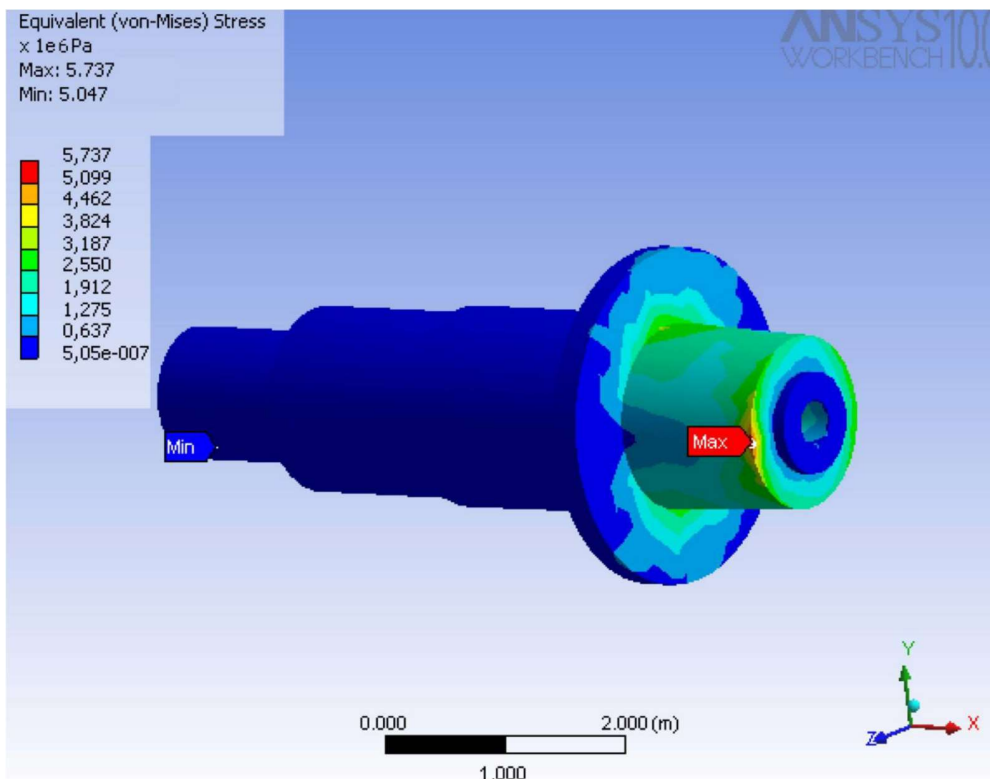


Рисунок 3.8 – Напружено-деформований стан шпинделя з врахуванням навантажень

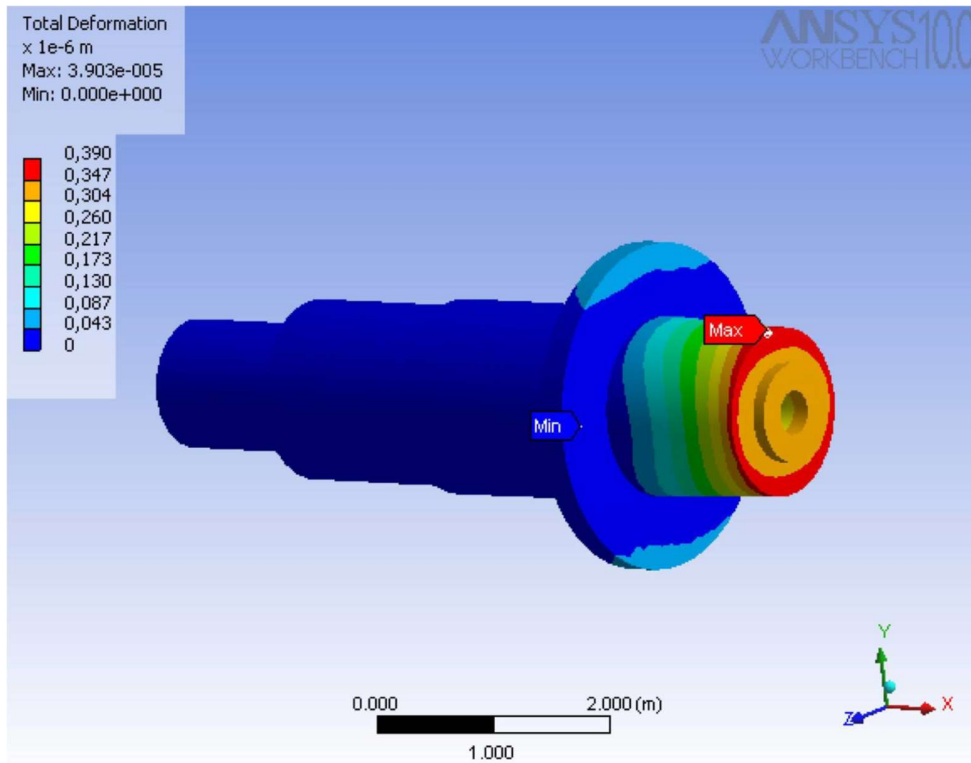


Рисунок 3.9 – Деформований стан шпинделя з врахуванням навантажень

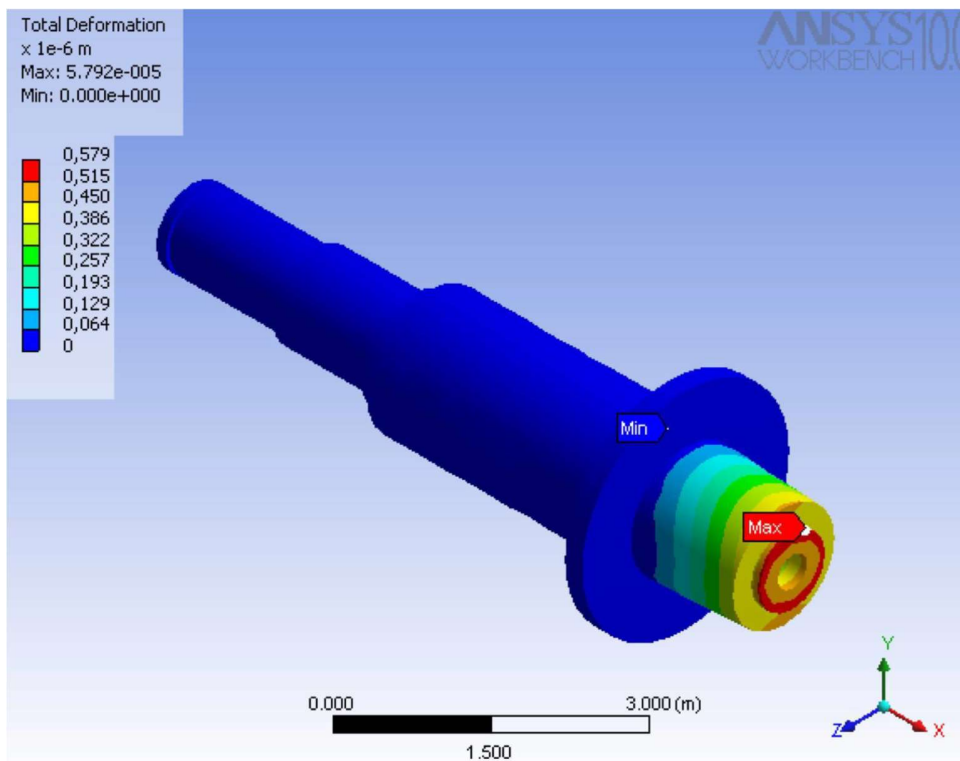


Рисунок 3.10 – Сприйняття максимальних деформацій шпинделем

Як видно з представлених розрахунків моделювання, найбільш навантаженою ділянкою шпинделя є передній кінець шпинделя. Але компенсувати ці пружні деформації можна способом встановлення додаткової опора із багатосегментними саморегульованими подушками, що підтискаються до планшайби.

ВИСНОВОК

В дані кваліфікаційній роботі магістра було вдосконалено процес виготовлення шпинделя токарного верстату такими методами:

1. Запропоновано одержання заготовки методом штампування на кривошипному гаряче штампувальному пресі (КГШП). Порівняно з альтернативним варіантом одержання заготовки коефіцієнт використання матеріалу збільшується на 5%, тобто збільшується економія металу.

2. Модернізовано технологічний процес виготовлення шпинделя в умови з використанням на токарних операціях верстатів із ЧПУ, що дозволяє порівняно з альтернативним варіантом скоротити час обробки на 29%, знизити собівартість механічної обробки деталі на 23%.

3. На кінцевій операції обробки підшипникових шийок шпинделя застосована операція суперфінішу, що призводить до покращення якості обробленої поверхні, її зміцнення близько 10%, підвищення продуктивності обробки.

4. Сконструйовано свердло для глибокого свердління, що дозволило збільшити стійкість інструменту на 10%, продуктивність свердління зростає, в порівнянні з базовим ТП, де відбувається зовнішнім відведенням стружки.

5. Змодельовано можливі деформації шпинделя токарного верстату при максимальних навантаженням для підвищення його показників технологічної надійності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Polinkevich R., Zubovetska N., Redko R., Chetverzhuk T., Zaleta O., Valetskyi B., & Pylypets M. . Research of Temperature Processes During drilling of holes. *Advances in Mechanical Engineering and Transport*, 2025, 2(25). p. 305-312. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i25.1944>
2. Taras Chetverzhuk, Oleg Zabolotnyi, Viktor Sychuk, Roman Polinkevych and Anatolii Tkachuk. A Method of Body Parts Force Displacements Calculation of Metal-Cutting Machine Tools Using CAD and CAE Technologies. *Annals of Emerging Technologies in Computing (AETiC)*. pp. 37-47, Vol. 3, No. 4, 1st October 2019, Published by International Association of Educators and Researchers (IAER), DOI: 10.33166/AETiC.2019.04.004, Available: <http://aetic.theiaer.org/archive/v3/v3n4/p4.html>
3. Бондаренко С. Г. Основи технології машинобудування : навчальний посібник. – Львів : Магнолія, 2018. – 500 с.
4. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. – 220 с.
5. Бочков В.М. Розрахунок та конструювання металорізальних верстатів: Підручник. / В.М. Бочков, Р.І. Сілін, О.В. Гаврильченко. За ред. Р.І. Сіліна. – Львів: Видавництво «Бескид Бід», 2008. – 448с.
6. Говорун Т.П., Гапонова О.П., Марченко С.В. Матеріалознавство та технологія матеріалів: навч. посіб. Суми: СумДУ, 2020. – 163 с.
7. Головня В.Д. САПР технологічних процесів : конспект лекцій / В.Д. Головня. – Житомир : Житомирська політехніка, 2019. – 200 с.
8. Гордєєв О.Ф., Четвержук Т.І.. Безрозбірна діагностика стиків металорізальних верстатів на основі самоподібності деформацій. Прогресивні технології і системи машинобудування. - 2014. - № 1. С. 99-105. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Ptsm_2014_1_16.

9. Грабченко А. І. Інтегровані генеративні технології: навч. посібник / А. І. Грабченко, Ю. Н. Внуков, В. Л. Доброскок та ін.; під ред. А. І. Грабченко. – Харків: НТУ «ХП», 2011. – 416 с.
10. Грицай І.Є. Теорія різання. Лезове та абразивне оброблення металів: навчальний посібник. – Львів : Львівська політехніка, 2018. – 232 с.
11. ДСТУ 4738:2007. Прокат сортовий сталевий гарячекатаний круглий. Сортамент. (EN 10060:2003, NEQ).
12. Дубовой В.М., Кветний Р.Н., Михальов О.І., Усов А.В. Моделювання та оптимізація систем: підручник / – Вінниця: «ГД «Едельвейс», 2017. – 804 с.
13. Інноваційні підходи в підготовці магістрів з прикладної механіки : навч. посіб. / Т. Є. Божко, Б. П. Валецький, Л. М. Самчук, Т. І. Четвержук . – Луцьк : Вежа-Друк, 2024. – 324 с. ISBN 978-966-940-536-4.
14. Ковальов В.Д., Васильченко Я.В., Міхєєв А.О., Четвержук Т.І. Управління точністю траєкторних переміщень виконавчих органів верстата на гідростатичних підшипниках. «Перспективні технології та прилади»: Збірник наукових праць. Луцьк: ЛНТУ, 2024. Вип. 25. – С. 64-72. DOI: <https://doi.org/10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-25-10>
15. Кузнецов Ю.М. Технологічне обладнання з ЧПК: механізми і оснащення: Навч. посібник. Київ-Кременчук-Севастополь: Вид-во «Точка», 2014. – 500 с.
16. Методичні рекомендації до написання кваліфікаційної роботи за ступенем вищої освіти «магістр»: метод. рекомендації для здобувачів другого (магістерського) рівня вищої освіти освітньої програми «Прикладна механіка», спец. 131 Прикладна механіка, галузі знань 13 Механічна інженерія денної та заоч. форм навч. / уклад.: Т. І. Четвержук, Р. М. Полінкевич. – Луцьк: ЛНТУ, 2024. 48 с.
17. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки: навчально-методичний посібник / Ю.Є.

Паливода, А.Є. Дячун, Р.Я. Лещук. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.

18. Петров О.В. Технологічна оснастка : навчальний посібник / О. В. Петров, С. І. Сухоруков. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 123 с.

19. Проць Я.І. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів./ Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук – Тернопіль: ТНТУ ім. І.Пулюя, 2011. – 344с.

20. Солод В.Ю. Експлуатація та ремонт технологічного обладнання механічних цехів. Навчальний посібник / В.Ю. Солод, О.В. Чернишов // Кам'янське, ДДТУ, 2018. – 275 с.

21. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування. Монографія / Є.А. Фролов, С.І. Кравченко, С.В. Попов, С.М. Гнітько. Полтава, 2019. – 204 с.

22. Цвіркун Л.І. Робототехніка та мехатроніка: навч. посіб. / Л.І. Цвіркун, Г. Грулер ; під заг. ред. Л.І. Цвіркуна ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. –3-тє вид., переробл. і доповн. – Дніпро: НГУ, 2017. – 224 с.

23. Четвержук Т., Полінкевич Р., Редько Р., Скляр Р. Системний підхід як основа автоматизації проектування та модернізації токарного верстатного обладнання. Тези доповідей V Міжнародної науково-практичної конференції «Прикладні науково-технічні дослідження», м. Івано-Франківськ, 5-7 квітня 2021 року. С. 157-159.

24. Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Зубовецька Н.Т., Сичук В.А. Частотний аналіз биття шпинделя металорізального верстата на основі нейронних мереж. Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2019: збірник наукових праць міжнародної наукової конференції «Нейромережні технології та їх застосування НМТіЗ-2019»/ за заг. ред. С.В.Ковалевського. – Краматорськ: ДДМА, 2019. – С. 99-110.

25. Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Редько О.І. Дослідження температури опор шпindelьних вузлів металорізальних верстатів. Тези доповідей X Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні PTME 2022» м. Івано-Франківськ – Яремче 1-5 Лютого 2022. С. 136-138.

26. Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Редько Р.Г., Залета О.М., Склярів Р.А. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2021. №71. – С. 322-329. DOI: <https://doi.org/10.36910/6775.24153966.2021.71.47>

27. Четвержук Т.І., Редько Р.Г., Полінкевич Р.М., Залета О.М., Валецький Б.П.. Проблеми та задачі проектування та розрахунку несучих частин металорізальних верстатів з урахуванням навантажень. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2022. №73. – С. 101-104. DOI:<https://doi.org/10.36910/775.24153966.2022.73.15>

28. Шумчук О., Четвержук Т. Моделювання пружних деформацій шпindelьного вузла токарного верстату. Тези V студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії». Луцьк: ЛНТУ – 2025. – С. 195-198.

ДОДАТКИ