

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня вищої освіти Магістра
Бакалавра (Магістра)

***Підвищення якості виготовлення осей автомобілів
шляхом оптимізації процесу поверхнево-пластичного
деформування***
Назва теми

Галузь знань 13 Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань

Спеціальність 132 Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності

Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва

Шифр КРМ МТВА 25.24356.000 ПЗ

Виконав студент(ка) 2-го курсу
група МТВАм 24-1
Шифр


Підпис

Владислав САВЕЛЬЄВ
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник д-р техн. наук, професор
Науковий ступінь, вчене звання


Підпис

Павло КАПЛУН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер доцент кафедри ТАМ
Посада


Підпис

Олег БАБАК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ
Назва


Підпис

Олександр ДИХА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 06 грудня 2025

Факультет факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Напрямок підготовки (спеціальність) 132 «Матеріалознавство»

Освітньо-професійна програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Духа О.В.

13 жовтня 2025 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Савельєву Владиславу Миколайовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Підвищення якості виготовлення осей автомобілів шляхом оптимізації процесу поверхнево-пластичного деформування».

керівник роботи Каплун Павло Віталійович, д-р.техн.наук, професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом університету від 25 серпня 2025 р. № 65 (Д28)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 1 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Матеріали практики; зразки деталей типу «вісь»; ділянка механічної обробки з технологічним обладнанням; верстати: круглошліфувальний, розточний, токарно-гвинторізний, фрезерувальний, координатний з блоком керування з ЧПУ; пароповітряний молот; кривошипно-шатунний прес, муфельна піч; ЕОМ із спеціалізованим програмним забезпеченням: пакетами прикладних програм КОМПАС-3D, ANSYS.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз технологічних процесів виготовлення деталей згідно завдання.

2. Удосконалення технологічного процесу виготовлення.

3. Наукове обґрунтування та дослідження ППД для вдосконалення конструкції пристрою.

4. Практична цінність здобутих результатів.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічну частину проекту представити у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _----

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1	Літературний огляд	30.09.2025	
2	Технологічний розділ	25.10.2025	
3	Конструкторський розділ	10.11.2025	
4	Дослідницький розділ	15.11.2025	
5	Оформлення розрахунково-пояснювальної записки	22.11.2025	
6	Оформлення презентації кваліфікаційної роботи	01.12.2025	
7	Нормоконтроль проекту	05.12.2025	
8	Підписання розділів. Затвердження дати захисту	05.12.2025	

Студент



 Підпис

Керівник роботи



 Підпис

Владислав САВЕЛЬСВ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Павло КАПЛУН

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 82 сторінки, кількість рисунків – 34, таблиць – 11, додатків – 1, кількість джерел згідно із переліком посилань – 25.

Об'єкт дослідження: визначено комплекс операцій формоутворення елемента типу «вісь». Предметом дослідження є накатування як метод локального зміцнення поверхневих шарів.

Мета роботи: підвищення результативності технологічного маршруту виготовлення вісі автомобільної конструкції шляхом інтенсифікації процесу поверхнево-пластичного зміцнення.

Результати та їх новизна: полягає у визначенні закономірностей зміни напружено-деформаційного стану при дії подвійного накатного інструмента, уточненні максимальних величин переміщень та еквівалентних напружень, а також у встановленні частот коливань, небажаних у робочому режимі обладнання. Отримані результати дозволяють обґрунтувати ефективність застосування модернізованої конструкції накатника для зміцнення поверхонь вісі.

Рекомендації щодо використання результатів роботи: полягає в можливості інтеграції запропонованої накатної головки у виробничі умови машинобудівних підприємств, що дає змогу підвищити стабільність параметрів деталей, скоротити технологічні витрати та забезпечити довговічність готових виробів.

Перелік ключових слів: ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ВІСЬ, НАКАТУВАННЯ, ВЕРСТАТНИЙ ПРИСТРІЙ ПОВЕРХНЕВА ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ.

Перелік умовних позначень

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості поверхні, мкм. Основний параметр шорсткості, що характеризує якість обробленої поверхні після точіння, шліфування або ППД.


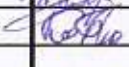


σ – еквівалентні (діючі) напруження в матеріалі, МПа. Використовуються при перевірці міцності та аналізі напружено-деформованого стану деталей у розрахункових комплексах (ANSYS, Abaqus).

f – подача, мм/об або мм/хв. Визначає переміщення інструмента відносно заготовки за один оберт шпинделя або за одиницю часу; впливає на шорсткість і навантаження в зоні різання.

ε_B – похибка базування, мм. Складова технологічної похибки, що зумовлена неточним орієнтуванням заготовки щодо вибраних технологічних баз.

t – глибина деформації або глибина накатування, мм. Основний параметр процесу ППД, що визначає рівень зміцнення, товщину наклепаного шару та величину залишкових напружень.

	Зміст	С.
	Вступ	7
1	АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ	9
1.1	Аналіз функціонального призначення машини, ролі вузла та характеристик деталі. Умови експлуатації	9
1.2	Аналіз технічних вимог до конструкції деталі та визначення технологічних завдань її виготовлення	16
1.3	Характеристика типу виробництва та форми організації виготовлення	21
1.4	Аналіз технологічності конструкції деталі	23
1.5	Аналіз базового (типового) технологічного процесу	27
1.6	Висновки та завдання щодо удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі	29
2	УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ	31
2.1	Формування варіантів технологічних маршрутів та вибір найбільш раціонального	31
2.2	Обґрунтування вибору способу виготовлення вихідної заготовки	34
2.3	Розрахунок припусків на механічну обробку поверхні обертання	38
2.4	Призначення та обґрунтування схем базування і закріплення	40
2.5	Обґрунтування та вибір моделей металорізального обладнання	45

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Савельєв			Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Каплун				5	82
Реценз.					<i>ХНУ, МТВАм-24-1</i>		
Н. Контр.		Бабак					
Затверд.		Диха					

Підвищення якості виготовлення осей автомобілів шляхом оптимізації процесу поверхнево-пластичного деформування

2.6	Обґрунтування та вибір пристроїв, інструменту й обладнання контролю	49
2.7	Проектування верстатного пристрою	51
2.8	Висновки за розділом	60
3	НАУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ	61
3.1	Теоретичні засади поверхнево-пластичного деформування	61
3.2	Створення вдосконаленої конструкції пристрою для виконання поверхнево-пластичного деформування	69
3.3	Аналіз власних частот деталі	73
3.4	Висновки за розділом	77
	УЗАГАЛЬНЕНІ ВИСНОВКИ	79
	Список використаних джерел	80
	Додатки	82

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

ВСТУП

Актуальність тематики. У сучасній інженерній практиці провідне місце займає формування високотехнологічних систем, орієнтованих на підвищення результативності виробництва, удосконалення технічних рішень та розширення спектра застосування машин у різних секторах економіки. Після переходу на ринкову модель функціонування зросла потреба українських підприємств у надійних, прецизійних, економічно обґрунтованих виробках, здатних конкурувати з продукцією провідних виробників. Для досягнення необхідного рівня якості у виробниче середовище інтегрують сучасні системи, автоматизовані комплекси та високопродуктивні методи оброблення. Значну роль відіграє застосування верстатів із числовим програмним керуванням, що забезпечують гнучкість переналагодження, стабільність геометричних параметрів та можливість оперативного реагування на зміни технічних вимог. Таке обладнання дозволяє істотно збільшити темп виготовлення заготовок, оптимізувати структуру технологічного маршруту, зменшити потребу у великих обсягах ручних операцій і підвищити рівень автоматизації навіть у дрібносерійному виробництві. Поряд із цим скорочується тривалість адаптації оснащення, зменшується обсяг підгоночних робіт, а параметри деталей, отриманих за єдиною програмою, залишаються взаємозамінними, що позитивно впливає на логістичні та організаційні показники.

Мета дослідження – підвищення результативності технологічного маршруту виготовлення осі автомобільної конструкції шляхом інтенсифікації процесу поверхнево-пластичного зміцнення.

Об'єктом дослідження визначено комплекс операцій формоутворення елемента типу «вісь».

Предметом дослідження є накатування як метод локального зміцнення поверхневих шарів.

Методи дослідження. Під час виконання роботи використано положення теорії механічного оброблення, принципи проектування

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

прогресивних технологічних систем, а також сучасне обладнання з числовим керуванням, оснащене інструментом зі змінними твердосплавними пластинами та спеціалізованою оснасткою. Для побудови конструкторської документації застосовано середовище КОМПАС-3D, тоді як аналіз контактних напружень і деформацій при взаємодії роликів із заготівкою здійснювали за допомогою пакета ANSYS, що забезпечило можливість оцінки динамічної поведінки моделі та оптимізації параметрів впливу.

Наукова новизна полягає у визначенні закономірностей зміни напружено-деформаційного стану при дії подвійного накатного інструмента, уточненні максимальних величин переміщень та еквівалентних напружень, а також у встановленні частот коливань, небажаних у робочому режимі обладнання. Отримані результати дозволяють обґрунтувати ефективність застосування модернізованої конструкції накатника для зміцнення поверхонь вісі.

Практичне значення полягає в можливості інтеграції запропонованої накатної головки у виробничі умови машинобудівних підприємств, що дає змогу підвищити стабільність параметрів деталей, скоротити технологічні витрати та забезпечити довговічність готових виробів.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

1.1 Аналіз функціонального призначення машини, ролі вузла та характеристик деталі. Умови експлуатації

Елемент типу «вісь» входить до складу вузла «колісна пара», що є ключовою частиною ходового обладнання залізничного рухомого складу та забезпечує взаємодію транспортного засобу з рейковою інфраструктурою. Саме через колеса на рейки передаються вертикальні навантаження статичного характеру (власна маса) та динамічні складові, що виникають під час руху. Додатково, у процесі реалізації тягових і гальмівних режимів колісні поверхні створюють поздовжні горизонтальні сили, а при спрямуванні руху у колії – бічні компоненти, які стабілізують положення транспортного засобу.

Однією з характерних рис ходових систем залізниць, що відрізняє їх від багатьох типів наземних машин, є жорстке з'єднання коліс з віссю, утворюючи єдину обертову конструкцію – колісну пару. Вузол складається з двох коліс та осі, причому виконання може відрізнятися за варіантами розташування букс та підшипникових опор, які сприймають вертикальні навантаження (рисунок 1.1 а). Опорні шийки можуть бути розміщені зовні коліс і опиратися на кінцеві ділянки осі, що робить технічне обслуговування підшипників у процесі експлуатації більш зручним і поширеним на різних типах рухомого складу, у тому числі тепловозах. Існує також схема, де опорні елементи розташовані між колісними дисками; вона властива переважно паровозам, конструкція яких передбачає розміщення механізмів приводу на зовнішніх поверхнях коліс.

Локомотивні колісні пари, на відміну від вагонних, виконують також функцію передавання крутного моменту. У цьому випадку вісь працює як силовий вал, що отримує момент від тягового приводу через зубчасту передачу (рисунок 1.1 б). При використанні циліндричних зубчастих коліс можливе виконання симетричного двостороннього приводу, характерного для окремих електровозів. Для тепловозів більш властивий однобічний варіант, зумовлений

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

конструктивними обмеженнями при розміщенні тягових електродвигунів значної потужності. У локомотивів з гідропередачею та карданною передачею зубчастий вінець встановлюють ближче до центральної частини осі, утворюючи схему центрального приводу.

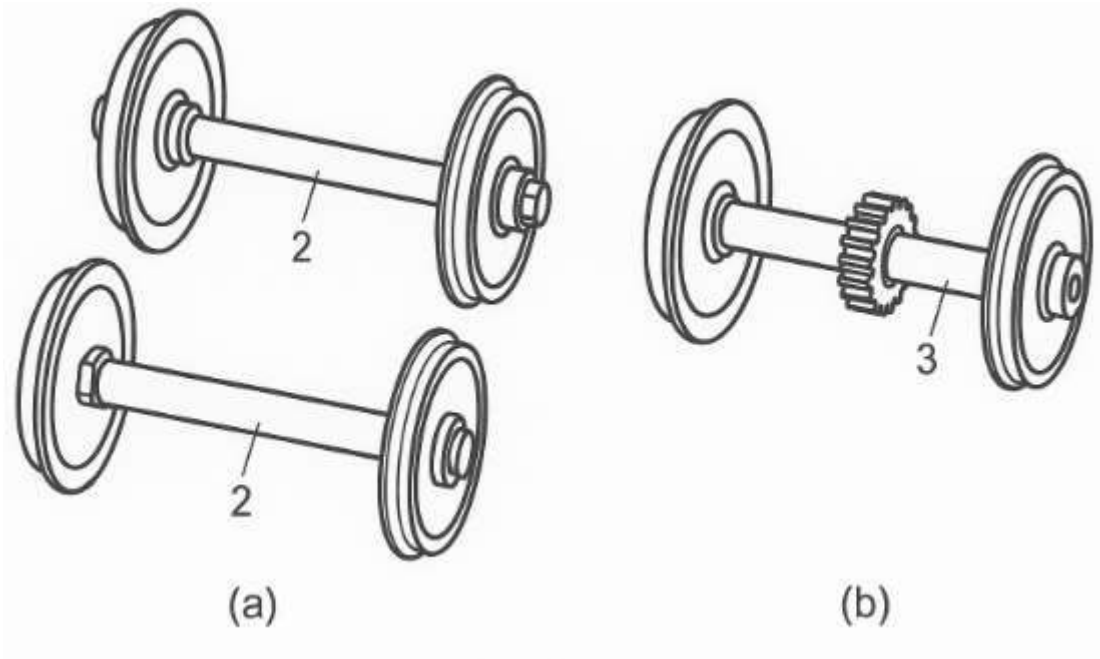


Рисунок 1.1 – Види колісних пар

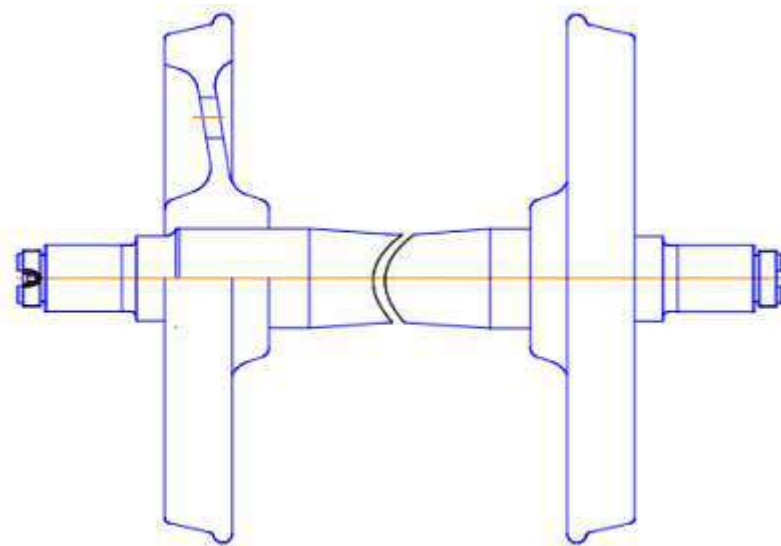


Рисунок 1.2 – Колісна пара

Технічні параметри та стан колісних пар визначають плавність руху тепловоза, рівномірність реалізації сили тяги, ступінь впливу на рейковий шлях і величину опору руху. Від цих характеристик залежить також безпека експлуатації поїздів, оскільки відхилення у геометрії або дефекти вузла безпосередньо впливають на поведінку екіпажної частини. Основні типи, габарити та вимоги до конструкції регламентуються відповідними стандартами, що забезпечує сумісність, надійність і відповідність експлуатаційним режимам.

Буксами називають елементи ходової системи, що забезпечують з'єднання обертової осі колісної пари з рамою візка та слугують для передавання через підшипникові опори 3 (рисунок 1.3) вертикального навантаження P , яке утворюється масою вагона або локомотива, на обертові елементи колісних пар. Крім того, через буксові шийки 2 на раму транспортного засобу передаються поздовжні горизонтальні сили – тягові F та гальмівні B , що виникають у процесі руху. Окремо слід відзначити, що через спеціальні упори 1 букси також сприймають бічні компоненти $У$, які стабілізують рух колісної пари на криволінійних ділянках колії та забезпечують правильне орієнтування ходового вузла.

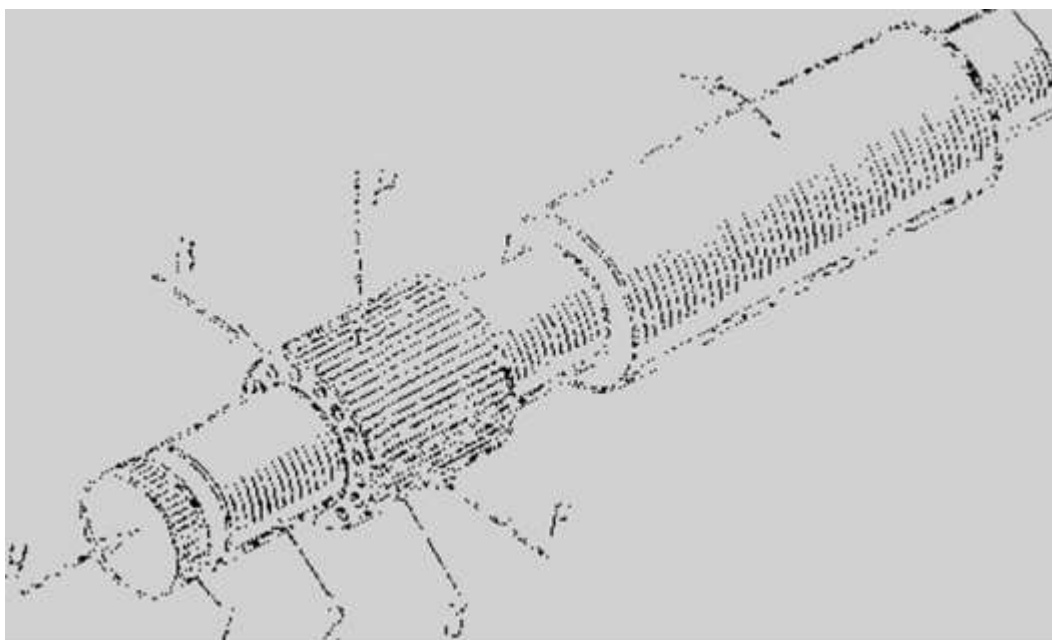


Рисунок 1.3 – Сили, що діють на підшипник та шийку вісі

Під буксовим вузлом розуміють комплект конструктивних елементів, до складу якого входять корпус із кришкою, підшипникові агрегати, упорні деталі та ущільнювальні пристрої, що спільно формують функціонально завершений механізм.

Розглянемо особливості роботи заданої колісної пари з урахуванням конструктивної будови буксового вузла та умов експлуатації.

Основним елементом буксового вузла є підшипникові опори, у яких відбувається обертання шийок осей. За конструктивною схемою підшипники поділяють на два типи: ковзання та кочення. Підшипники ковзання відзначаються простотою будови, проте потребують значного обсягу обслуговування, постійного контролю за мастильними матеріалами та станом підбивання, аналогічного моторно-осьовим підшипникам, а також характеризуються більшим опором при русі. Такі опори застосовувалися лише на ранніх серіях повоєнних вітчизняних тепловозів ТЕ1 і ТЕ2. На сучасних локомотивах використовують виключно букси з роликівими підшипниками кочення, які забезпечують підвищену надійність, не потребують щоденного нагляду й мають зменшені втрати на тертя.

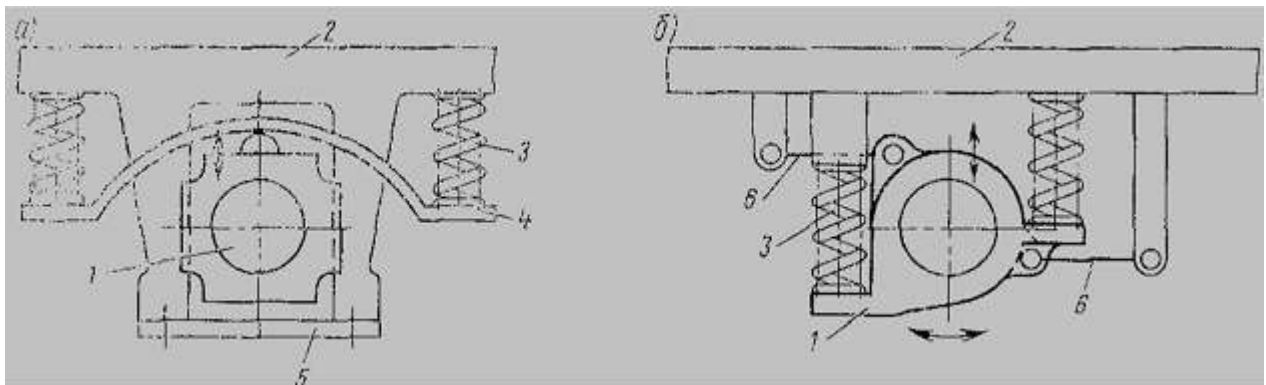


Рисунок 1.4 – Схема з'єднання букс с рамою

Передавання вертикального навантаження на буксовий вузол відбувається через пружні елементи 3, що можуть працювати разом із балансирними важелями 4 або без них (рисунок 1.4). Кріплення букс до рами локомотива чи візка реалізується різними способами. Найпоширеніший варіант передбачає

встановлення корпусу букси у вертикальні напрямні (кронштейни) рами за допомогою відповідних пазів (рисунок 1.4, а). Проте сила тертя між поверхнями напрямних і корпусом створює додаткові перешкоди для вертикальних переміщень, що виникають під час проходження нерівностей колії, і знижує плавність ходу тепловоза.

З цієї причини в останні роки усе частіше впроваджуються безщелепні (повідкові) букси, які з'єднані з рамою через шарнірні тяглові елементи б (рисунок 1.4, б). Така схема допускає не лише вертикальні переміщення, а й незначні кутові повороти відносно власної осі завдяки пружним властивостям шарнірів, що підвищує адаптивність вузла до змін у взаємодії коліс із рейками.

Деталь «Вісь» є ключовим елементом у складі вузла «Колісна пара» та забезпечує взаємодію всіх його складових. Характеристики функціонального призначення її поверхонь аналізують за даними складального креслення. На елементі типу «вісь» виділяють такі групи поверхонь (рисунок 1.5):

- основні конструкторські – 4, 12;
- допоміжні конструкторські – 1, 2, 6, 10, 13, 14, 15, 16, 17;
- виконавчі – 4, 12, 6, 10;
- вільні поверхні, що формують загальну геометрію та забезпечують жорсткість конструкції.

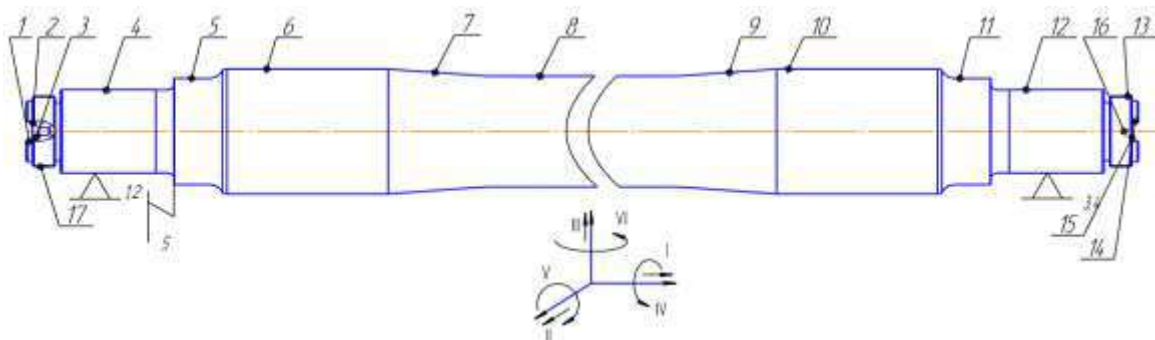


Рисунок 1.5 – Поверхні деталі «Вісь»

Під час аналізу осі в складі колісної пари встановлено, що деталь позбавляється п'яти ступенів свободи під час базування: реалізуються подвійна направляюча та опорна бази, що забезпечують фіксацію положення у просторі. Вільною залишається лише одна координата – обертання навколо осі X, яка відповідає робочому режиму функціонування деталі.

Відповідні матриці зв'язків і відповідностей наведені у таблицях 1.1 та 1.2, де подано структуру обмежень та характеристику взаємодії поверхонь із базувальними елементами вузла.

Таблиця 1.1 – Матриця зв'язків

Зв'язок	Ступінь свободи	
1, 2, 3, 4	II, III, V, VI	ДНБ
5	I	ОБ
6	IV	Вакансія

Таблиця 1.2 – Матриця відповідностей

	X	Y	Z	
<i>l</i>	0	1	1	ДНБ
<i>α</i>	0	1	1	
<i>l</i>	1	0	0	ОБ
<i>α</i>	0	0	0	
<i>l</i>	0	0	0	Вакансія
<i>α</i>	1	0	0	

$$\Sigma = 4 + 1 = 5 \text{ ступенів}$$

Розглянемо функціональне призначення окремих поверхонь деталі та вимоги, що висуваються до їх геометричних і експлуатаційних параметрів.

Поверхні 1, 14. Це бічні площини торцевої лиски, встановлені розміром 31 (+0,34) мм та шорсткістю $R_a = 12,5$ мкм. Вони виконують роль опорних баз під стопорну планку, яка утримує гайку в зафіксованому положенні.

Поверхні 2, 15. Дно торцевої лиски, визначене параметром 8 (+0,5) мм і тією ж шорсткістю $R_a = 12,5$ мкм. Служить другою опорною базою для стопорної планки, забезпечуючи її правильне положення.

Поверхні 3, 16. Центрові отвори, які використовуються як чистові бази. Вони формуються на першій технологічній операції (горизонтально-розточній) та забезпечують незмінність базування під час виконання чорнового й чистового точіння, накатування та шліфування. Виготовляються за 14-м квалітетом із шорсткістю базової конічної поверхні $R_a = 1,6$ мкм.

Поверхні 4, 12. Циліндрична ділянка діаметром $\varnothing 130$ мм і шорсткістю $R_a = 1,25$ мкм. Служить посадковою зоною для буксових підшипників, які встановлюються з натягом 0,1–0,15 мм.

Поверхні 5, 11. Циліндрична частина $\varnothing 165 (-1,0)$ мм із шорсткістю $R_a = 2,5$ мкм. Розташована між зовнішніми шийками та подступичною ділянкою. Забезпечує плавний перехід від $\varnothing 130$ мм до $\varnothing 194$ мм, зменшуючи концентрацію напружень у зоні зміни діаметрів.

Поверхні 6, 10. Циліндричні площини $\varnothing 194$ мм із шорсткістю $R_a = 1,25$ мкм. Призначені для монтажу коліс. Посадка виконується з натягом 0,18–0,3 мм. Важливо витримувати міжбандажну відстань – 1440 мм, що забезпечується холодною або гарячою посадкою. Для запобігання корозії перед напресуванням наносять тонкий (до 0,02 мм) шар лаку або клею.

Поверхні 7, 9. Галтельні зони. На деталь діють знакозмінні навантаження, тому плавні переходи між діаметрами критично важливі для зменшення

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

напружень і недопущення розвитку втомних тріщин. Для зміцнення галтельних поверхонь застосовують накатування загартованими роликами з навантаженням 30–40 кН.

Поверхня 8. Циліндрична частина $\varnothing 172 (+3)$ мм із $Ra = 2,5$ мкм. Виконує допоміжну функцію, з'єднуючи посадкові ділянки під колеса та підшипники без виконання окремих силових чи кінематичних задач.

Поверхні 13, 16. Нарізана різьба $M100 \times 4-6h$ із шорсткістю витків $Ra = 2,5$ мкм. Призначена для встановлення стопорної гайки, яка стягує буксові підшипники й додатково фіксується стопорною планкою.

Усі інші поверхні є сполучними. Відповідно до вимог на деталь, допуски на ці ділянки встановлюють за 14-м квалітетом точності (ГОСТ 25346-82). Деталь «Вісь» має круглий поперечний переріз зі змінними діаметрами по довжині, зумовленими призначенням окремих зон. Під час роботи вона сприймає значні знакозмінні навантаження та працює в умовах підвищених вимог до міцності.

1.2 Аналіз технічних вимог до конструкції деталі та визначення технологічних завдань її виготовлення

Розглянута деталь «Вісь» належить до групи елементів типу валів, що підтверджується геометричним співвідношенням $l/d > 1$ ($2540/120 > 10$). Конструкція має достатню жорсткість, оскільки ділянки закріплення характеризуються значною товщиною стінок, що запобігає деформаціям під дією сил затиску, зокрема в патронах трикулачкового типу. Завдяки підвищеній жорсткості допускається застосування інтенсивніших режимів оброблення на початкових (чорнових) операціях.

Матеріалом деталі служить легована сталь марки 40Х, до складу якої входить приблизно 0,4 % вуглецю, 1 % хрому, а решту становить залізо. Як можливі замітники можуть бути використані сталі 45, 50 та 50Г2. Їх фізико-

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

механічні характеристики наведені в таблиці 1.3 і дозволяють обґрунтовано вибрати матеріал у разі потреби заміни.

Таблиця 1.3 – Фізико-механічні властивості сталей за ДСТУ 4543:2015

Матеріал	σ_b , МПа	Ψ , %	Твердість НВ	Хімічний склад, %			
				C	Si	Mn	Cr
Сталь 40Х	600	40	163-168	0,36-0,44	0,17-0,37	0,5-0,8	0,8-1,1
Сталь 45	610	35	170-179	0,42-0,50	0,17-0,37	0,5-0,8	< 0,25
Сталь 50	605	35	196-202	0,47-0,55	0,17-0,37	0,5-0,8	< 0,25
Сталь 50Г	585	25	167-207	0,46-0,55	0,17-0,37	1,4-1,8	< 0,25

Вибір матеріалу для виготовлення деталі не є випадковим: він визначається вимогами до надійності та міцності під час експлуатації. Оскільки вісь повинна забезпечувати тривалу роботу без відмов, сталь 40Х є технічно обґрунтованим рішенням. Незважаючи на її вищу вартість у порівнянні зі сталлю 45, застосування більш легованого матеріалу є необхідним для гарантування стабільної роботи колісної пари в цілому.

Аналіз технічних вимог, передбачених конструктором для деталі «Вісь»

1. «Розмір забезпечується інструментом».

Таке формулювання означає, що галтели та інші дрібні елементи формуються геометрією ріжучого інструмента, і точність їх отримання визначається профілем застосованої різальної частини.

2. «Розмір для довідок».

Подібні параметри характеризують допоміжні, малонавантажені або сформовані під час складання розміри, більшість яких є лінійними.

3. Вимога щодо накочування осі відповідно до DSTU EN 13262.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. Накатування повинно забезпечити збільшення поверхневої твердості щонайменше на 22 %, із подальшим поверненням твердості до початкових значень на глибині не менше 0,02–0,04 мм від зовнішнього діаметра оброблюваної ділянки. Норматив допускає:

Відсутність наклепаного шару на шийках і перехідних ділянках на довжині до 8 мм від торця з подальшим приростом товщини зміцненого шару на ділянці 12–14 мм.

На галтельних частинах – вільну від наклепу зону довжиною до 3 мм від торця перехідної ділянки, а також до 12 мм від початку подступичної зони з подальшим плавним зростанням товщини наклепу.

Зменшення глибини зміцнення на конічних поверхнях подступичних ділянок.

Після накочування допускається шліфування шийок і перехідних частин з припуском до 0,4 мм на сторону.

Ці положення визначають допустимий профіль неукріплених ділянок, параметри наклепаного шару та значення припусків під подальше чистове шліфування. Виконання нормативу гарантує підвищення міцності, твердісних характеристик, втомної витривалості й корозійної стійкості, що визначає довговічність деталі.

Додаткові допуски

Зміщення отвору Д відносно осі паза в межах позиційного допуску 0,2 мм.

Місцеве пошкодження різьби в отворах Д допускається в межах одного витка. Вимога визначає якість робочої різьбової поверхні, яка забезпечує фіксацію стопорної планки та впливає на працездатність вузла.

На торцях різьбової частини можливі локальні напливи металу: до 0,4 мм – з боку шийки, та до 1 мм – з боку паза за умови дотримання розмірів Е та Ж у площині напливу.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

5. У канавці різьби допускається виступ заввишки до 0,7 мм і шириною не більше 2 мм, якщо параметр З не виходить за межі допуску. Положення важливе для забезпечення правильного профілю різьби М100×4, особливо якщо вона формується накочуванням.

6. У середній частині осі після накочування можливі місцеві потовщення до 1,0 мм у місцях перекриття траєкторій роликів. Геометрична точність різьби має істотний вплив на працездатність та надійність пари гвинт-гайка.

На торці підступичної ділянки допускаються напливи металу висотою до 0,4 мм і шириною до 2 мм.

7. На поверхнях осі, окрім підступичної зони довжиною 220 мм, можливі світлові відблиски від підтримувальних роликів люнета, які не змінюють твердість і шорсткість. Це регламентує допустимі сліди опорних елементів прихватної системи.

8. Дозволяється зачистка наждачним матеріалом або абразивом місць переходу конусних ділянок у циліндричні на довжині до 16 мм, за умови збереження параметра шорсткості. Така обробка застосовується при неможливості формування чистого переходу на механічних операціях.

9. На підступичних ділянках допускається поява світлових відблисків глибиною до 0,007 мм, що виникають унаслідок тимчасового прослизання осі на роликовому транспортері автоматизованої лінії. Це уточнює допустимі незначні дефекти, пов'язані з транспортуванням.

10. Повторна накатка очищених місць на підступичних поверхнях не виконується. Зачистка локальних подряпин та звивистих рисок повинна здійснюватися поздовжнім напрямком до встановленої шорсткості. Вимога визначає порядок ручного згладжування забоїн, що утворилися після накатування, із забезпеченням необхідної якості поверхонь.

11. На торці осі в зоні паза виконується маркувальний керн глибиною 0,5–1 мм і діаметром не більше 1,5 мм. Це регламентує максимальні параметри інструменту для нанесення маркування.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

12. На стінках паза дозволяються вм'ятини двох типів:

- глибиною до 0,4 мм і довжиною до 8 мм,
- або глибиною до 0,2 мм і довжиною до 14 мм.

Такі відбитки є допустимими слідами від ведучих пальців патрона.

13. На підступичних ділянках, на відстані не меншій ніж 225 мм від торців, допускаються відбитки твердоміра Роквелла глибиною до 0,2 мм у кількості не більше трьох. Вимога визначає місця контролю твердості та граничні параметри отриманих заглиблень.

14. Різьбу, сформовану методом накатування, не контролюють за одним витком, окрім західних частин з обох боків. Обов'язковою умовою є забезпечення мінімального зачеплення гайки не менше ніж п'ятьма повними витками.

15. Для різьби, виконаної методом нарізання, встановлено параметр шорсткості $R_a = 2,5$ мкм. Ця вимога регламентує якість профілю витків та забезпечує точність, довговічність і надійність різьбового з'єднання.

16. Дозволяється зачищення першого витка різьби з боку торця у разі наявності локальних забоїв. Мета вимоги – забезпечити правильне базування та плавність накручування стопорної гайки.

17. Допускається зміщення діаметра D відносно центрального конуса $\varnothing 1$ мм у межах залежного допуску.

18. Оброблення ділянки за штрихпунктирною лінією виконується зі зняттям матеріалу; у подальших операціях галтельні переходи накочуються до креслярських значень.

Додаткові вимоги

– Для осей, виготовлених за варіантом 2 зовнішнього елемента IV, маса становить 435 кг; для варіантів 1 або 3 – 419 кг.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

– Під час дефектоскопії не допускається накопичення магнітного порошку.
Це забезпечує чистоту поверхні від пилу, піску та сторонніх частинок.

– Інші технічні положення регламентуються стандартом ДСТУ ГОСТ 31334:2009.

– Розмір фасок Н контролюється до виконання накатування або нарізання різьби, оскільки фаски можуть деформуватися в процесі формування профілю.

– Допускається формування фасок П радіусом R1–2 мм, що забезпечує притуплення гострих крайок.

– На поверхні Р допускаються гвинтові сліди від виходу різця глибиною до 0,5 мм та шириною до 2 мм. Такі лінії є можливими при завершенні різьбонарізання.

– Діаметр До повинен бути у межах 164,9–165,0 мм.

– Для осей, що не виготовляються на автоматичних лініях, допускається радіальне биття підступичних зон відносно шийок до 0,2 мм. Це пояснює зниження точності у дрібносерійному чи ремонтному виробництві.

– Розміри, не зазначені окремими допусками, приймають за такими правилами:

- для отворів – H14,
- для валів – h14,
- лінійні величини – $\pm IT12/2$.

Це визначає точність оброблення поверхонь, які не належать до відповідальних

1.3 Характеристика типу виробництва та форми організації виготовлення

Виробництво належить до дрібносерійного типу, який за своїми особливостями наближений до одиничного. Для нього характерні значна

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

різноманітність найменувань деталей, обмежені обсяги виготовлення та виконання широкого спектра операцій на різних робочих місцях.

Показником, що визначає рівень закріплення операцій, є співвідношення між загальною кількістю різних технологічних переходів, виконуваних протягом місяця, та числом робочих місць. Згідно з ДСТУ ГОСТ 3.1001:2014, для дрібносерійного виробництва коефіцієнт закріплення становить понад 20 та до 40 включно.

За своїми технологічними та організаційними ознаками серійне виробництво займає проміжне місце між одиничним та масовим. Для нього застосовують універсальне, спеціалізоване та частково спеціальне устаткування. Широко впроваджуються верстати з числовим керуванням, обробні центри, а також гнучкі автоматизовані комплекси з ЧПК, інтегровані з транспортними пристроями та системами керування на базі ЕОМ.

Технологічне оснащення здебільшого універсальне, проте при необхідності розробляють високопродуктивне спеціальне оснащення, використання якого має бути обґрунтовано техніко-економічними розрахунками. Значного поширення набувають універсально-збірні та переналагоджувані системи, що підвищують ефективність виробничих процесів.

Як заготовки застосовують гарячекатаний та холоднокатаний прокат, лиття другого класу точності, прецизійні способи лиття, а також точні штампування – вибір виду заготовки визначається економічною доцільністю. Необхідних параметрів точності досягають як автоматизованими методами формування розмірів, так і використанням пробних проходів, вимірювань і часткової розмітки.

Кваліфікація персоналу вища, ніж у масовому виробництві, але нижча, ніж в одиничному. На складних універсальних верстатах працюють кваліфіковані фахівці та налагоджувальники, водночас частина операцій виконується операторами на попередньо налаштованих верстатах. Технологічна

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

документація розробляється докладно для складних заготовок, а для простих деталей допускається спрощена форма та статистичні методи нормування.

Для серійних умов рекомендована предметна форма організації праці, коли обладнання розміщують у послідовності виконання операцій для конкретної деталі. Обробка здійснюється партіями; водночас тривалість операцій на різних верстатах може не збігатися. Партії деталей зберігають біля обладнання, а між операціями – на спеціальних майданчиках, де проводиться контроль.

Дрібносерійне виробництво характеризується тим, що на одному робочому місці закріплено від 21 до 40 операцій, що відповідає вимогам ДСТУ ГОСТ 3.1001:2014 для цього типу організації.

1.4. Аналіз технологічності конструкції деталі

Оцінювання технологічності деталі типу «Вісь» за якісними характеристиками охоплює декілька ключових аспектів.

Матеріал деталі. Вісь виготовляється зі сталі 40Х, склад якої наведено у попередньому підпункті. Найближчим за властивостями заміником може бути сталь 45, що за структурою та механічними параметрами подібна до основного матеріалу. Собівартість сталі 40Х невисока, оскільки вона легована лише близько 1 % хрому. Матеріал є доступним, що спрощує його постачання.

Завдяки легуванню хромом сталь 40Х краще піддається різанню порівняно, наприклад, зі сталлю 45. Використання міцніших і водночас легших сплавів є недоцільним, оскільки це або значно підвищить вартість, або знизить працездатність деталі в реальних умовах експлуатації. Отже, за критерієм вибору матеріалу деталей можна вважати достатньо технологічною.

Геометричні форми та можливість застосування обладнання. Аналіз конфігурації поверхонь показує, що більшість з них є простими – переважно плоскими або циліндричними, що сприяє стабільності розмірної точності та полегшує обробку.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Маса заготовки становить 416 кг, тому для її транспортування та встановлення необхідно використовувати вантажопідіймальні пристрої (кран-балку, мостові крани).

У конструкції присутні окремі нетехнологічні елементи, до яких належать:

– значні габарити й маса, що ускладнюють маніпулювання заготовкою на виробничій ділянці;

– потреба у зміцненні поверхонь накочуванням, що збільшує тривалість обробки та собівартість;

– максимальний діаметр оброблення $\varnothing 209$ мм, для якого потрібен потужний привід головного руху;

– необхідність застосування великогабаритних верстатів, що є суттєво дорожчими за менш потужні аналоги;

– формування різьби M110×4-6h, що потребує спеціального інструмента та є трудомістким процесом;

– наявність складних галтельних переходів, виконання яких вимагає застосування верстатів з ЧПК, дорожчих приблизно у 1,5 раза порівняно з універсальними;

– підвищені витрати на амортизацію та експлуатацію такого обладнання.

Усі наведені обмеження зумовлені конструктивними вимогами, тому істотно змінити їх неможливо.

Вимоги до точності та шорсткості. Циліндричні поверхні повинні мати шорсткість $R_a = 1,25-2,5$ мкм і точність 6–9 квалітету, що досягається шліфуванням. Це зумовлює необхідність виконання круглошліфувальних операцій, а відповідно – додаткових витрат.

Відношення довжини до діаметра $l/d \geq 12$ потребує застосування люнета, що збільшує час налаштування та впливає на собівартість.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Базувальні поверхні мають розвинену конфігурацію, тому затискування заготовки не викликає особливих труднощів.

Нетехнологічною є вимога щодо биття торця Ø130/Ø165 відносно бази С до 0,02 мм, що потребує виконання чистової токарної операції з одноустановним формуванням бази та торця, суворим дотриманням режимів різання і використання інструмента з оптимальною геометрією.

Заготовка та вимоги до контролю. Деталь виготовляється з поковки V групи, що відповідно до ДСТУ ГОСТ 3.1128:2014 передбачає:

- 100% контроль твердості;
- виготовлення зразків для розтягнення та ударної в'язкості;
- відбирання зразків від кожної поковки;
- повторні випробування при незадовільних результатах на подвоєній кількості зразків;
- розташування осі зразка на 1/6 діагоналі заготовки.

Ці вимоги суттєво підвищують трудомісткість та збільшують витрати на контроль, що знижує технологічність заготовки.

Кількісний аналіз технологічності. У наступному підпункті здійснюється розрахунок коефіцієнта використання матеріалу, що дозволяє оцінити економічність конструкції та ефективність застосованої заготовки

$$K_{\text{им}} = \frac{M}{M_3}, \quad (1.1)$$

де M – маса готової деталі, 416 кг, M_3 – маса заготовки 690 кг.

$$M_3 = M \cdot K_p = 416 \cdot 1,6 = 685 \text{ кг} \quad (1.2)$$

$$K_{\text{им}} = \frac{416}{685} = 0,61.$$

Рівень технологічності конструкції за матеріалом:

$$K_{\text{ум}} = \frac{K_{\text{б им}}}{K_{\text{им}}}, \quad (1.3)$$

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

де $K_{б\text{им}}$ – базовий коефіцієнт використання матеріалу, 416 кг,

$K_{б\text{им}} = 0,3$ (дані надані підприємством-виробником);

$$K_{ум} = \frac{0,3}{0,625} = 0,49.$$

Коефіцієнт точності обробки:

$$K_T = 1 - \frac{1}{T_{ср}} = 1 - \frac{\sum n_i}{\sum T \cdot n_i}, \quad (1.4)$$

де $\sum n_i$ – число розмірів відповідного класу точності;

T – клас точності обробки.

$$\sum n_i = 1 + 1 + 1 + 5 + 1 = 9$$

$$\sum T \cdot n_i = 7 \cdot 1 + 8 \cdot 1 + 9 \cdot 1 + 14 \cdot 5 + 16 \cdot 1 = 110$$

$$K_T = 1 - \frac{9}{110} = 0,91 > 0,8$$

Таблиця 1.4 – Якісна оцінка технологічності

Найменування поверхні	Кількість поверхонь, шт.	Квалітет точності	Параметр шорсткості Ra, мкм
1	2	3	4
Поверхня $\varnothing 130$	2	6	1,25
Поверхня $\varnothing 90$	4	16	6,3
Поверхня $\varnothing 165$	2	12	2,5
Поверхня $\varnothing 194$	2	17	1,25
Поверхня $\varnothing 172$	1	17	2,5
Поверхня $\varnothing 42$	2	14	12,5
Поверхня $\varnothing 10,5$	4	14	12,5
Різьба М110х4	2	6	2,5
Різьба М12	4	7	3,2
Торці	10	14	16,3
Фаски	16	14	3,2
Дно паза	1	14	12,5
Бічні поверхні паза	2	12	12,5
Конус 90°	2	14	12,5
Конус 120°	2	14	1,6
Галтели	20	14	2,5
Σ	76	1013	360,4

За цим критерієм можна зробити висновок, що деталь є технологічною.

Перейдемо до визначення коефіцієнта, який характеризує рівень шорсткості поверхонь:

$$K_{ш} = 1 - \frac{1}{Ш_{ср}} = 1 - \frac{\sum n_{it}}{\sum Ш \cdot n_{it}}, \quad (1.5)$$

де $\sum n_{it}$ – число поверхонь відповідного класу шорсткості.

$$\sum Ш \cdot n_{it} = 2,5 \cdot 2 + 3,2 \cdot 2 + 6,3 \cdot 5 = 42,9$$

$$K_{ш} = \frac{9}{42,9} = 0,2 < 0,32.$$

За цим критерієм можна зробити висновок, що деталь є технологічною.

1.5 Аналіз базового (типового) технологічного процесу

Оцінювання проводиться на основі базового технологічного процесу, структура якого відповідає стандартній послідовності механічної обробки відповідно до загальноприйнятих принципів побудови технологічних маршрутів. Для порівняння розглянемо заводський варіант технологічного процесу виготовлення деталі типу «Вісь».

У типовому процесі вихідною заготовкою є поковка, отримана на молотах, що є оптимальним способом формування заготовок, оскільки геометрія кування максимально наближена до форми готового виробу. У запропонованому технологічному маршруті також застосовується поковка як вихідний матеріал.

На початкових операціях заготовку обов'язково піддають термічній обробці. Це необхідно для подрібнення зернистої структури, усунення внутрішніх напружень, що виникають у процесі кування, та забезпечення заданої твердості. Надалі, на лентопильному обладнанні відділяють контрольний зразок, який розкроюють на випробні елементи.

Під час контрольної стадії виконують механічні випробування: розтягнення, розрив, перевірку на міжкристалітну корозію. На горизонтально-

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

розточувальній операції проводять торцювання та центрування заготовки, формуючи чистові бази.

На токарній операції з двома установками здійснюється чорнова обробка під ультразвуковий контроль (УЗК). Після цього проводять контрольну операцію – безпосередньо УЗК для виявлення внутрішніх дефектів.

На наступній токарній операції з двох установок відбувається остаточне точіння осі або формування припусків під накатування чи шліфування. На комбінованій токарно-накатній операції виконують зміцнювальне накатування шийок.

Після цього на круглошліфувальних операціях (також у двох установках) здійснюють шліфування шийок під монтаж буксових підшипників. Наступною стадією є контроль за допомогою кольорової дефектоскопії.

На завершальному етапі виконують кінцевий контроль усіх розмірів і допусків згідно з вимогами креслення. Базовий технологічний процес доцільно представити у табличній формі.

Таблиця 1.5 –Базовий технологічний процес

№ оп.	Найменування операції	Зміст операції	Базування	Обладнання
005	Обробка тиском			
010	Термічна	Досягнення твердості та міцності заготовки		Термічна піч
015	Виготовлення зразків	Відрізка та розкрій проби на зразки		
020	Технічний контроль	Випробування зразків		
025	Горизонтально-розточна	Торцювання та центрування вісі	На верстаті в призмах	2636
030	Токарна	Чорнове точіння під УЗК	В центрах	16К20М
035	Технічний контроль	УЗК	В центрах	
040	Токарна	Чистове точіння вісі	В центрах	16К20М
045	Токарно-накатна	Накатка шийок	В центрах	КЖ1844
050	Технічний контроль	Кольорова дефектоскопія		

055	Круглошліфувальна	Шліфування шийок	В центрах	ЗМ194
060	Технічний контроль	Контроль розмірів та допусків		
065	Слюсарна			

Розглянувши технологічний маршрут, можна зазначити, що механічна обробка охоплює практично весь спектр груп металорізального обладнання. Використання універсальних верстатів доцільно замінити на машини з числовим програмним керуванням, що дасть змогу зменшити основний час оброблення, стабілізувати параметри точності й мінімізувати вплив операторського фактора.

1.6 Висновки та завдання щодо удосконалення технологічного процесу виготовлення деталі

Якість виконання обробки суттєво залежить від правильності встановлення та закріплення заготовки. Монтаж заготовки включає операцію базування, тобто орієнтування відносно інструмента, елементів технологічної системи або траєкторії руху, а також процес закріплення – прикладання зусиль, необхідних для надійної фіксації положення, отриманого під час базування.

У межах узагальнення результатів аналізу можна запропонувати такі напрями вдосконалення:

розроблення технологічного процесу відповідно до сучасних принципів машинобудівної технології з широким використанням верстатів і обробних центрів з ЧПК;

створення прогресивної заготовки з мінімальними припусками, що забезпечить раціональне витрачання матеріалу та скорочення оброблюваних обсягів;

виконання розрахунків припусків на чистові поверхні з урахуванням вимог креслення та можливостей обраного обладнання;

визначення раціональної схеми базування й послідовності закріплення деталі на операціях механічної обробки.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.6 – Методи забезпечення розмірної точності з урахуванням параметрів шорсткості поверхонь

Група поверхонь	Найменування	Методи досягнення точності та шорсткості
Точні 6-8 квалітети	Зовнішня циліндрична Ø130k6	Для забезпечення необхідної точності та параметрів шорсткості використовують чотири послідовні стадії механічної обробки: чорнову, напівчистову, чистову та оздоблювальну. Формування остаточної шорсткості відбувається на заключній стадії, а результат залежить від жорсткості технологічної системи «верстат–прилад–інструмент–деталь», правильного добору режимів різання та інструментального матеріалу
Середньої точності 9-11 квалітети	Зовнішня циліндрична Ø165h11	Для забезпечення необхідної точності та параметрів шорсткості, застосовують дві стадії точіння – чорнову та напівчистову. Показники шорсткості формуються на другому етапі, а їх стабільність забезпечується високою жорсткістю технологічної системи і раціональним добором подачі, глибини різання та інструмента.
	Різьба M110x4 – 6h	Досягнення заданої точності та шорсткості при обробці окремих поверхонь може бути забезпечене використанням двох різців, один з яких формує основний розмір, а другий – чистову поверхню
	Пази 31H10	Шорсткість і точність паза отримують завдяки двом етапам фрезерування – чорновому та чистовому. На якість результату впливають жорсткість технологічної системи, режими різання та вибір інструментального матеріалу.
Грубі 12-14 квалітети	Всі інші розміри	Для досягнення точності 12–14 квалітетів достатньо застосувати чорнове або напівчистове точіння, а також інші способи механічної обробки – свердління чи фрезерування. На цих стадіях використовують збільшені подачі та зменшені швидкості різання порівняно з режимами, що застосовуються для чистових або оздоблювальних проходів. Ріжучий інструмент, призначений для такої обробки, містить у складі у 2–2,5 рази більше кобальту, ніж інструмент, що застосовується для чистових операцій.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРММТВА25.24356.000 ПЗ

Арк.

30

2. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛІ

2.1 Формування варіантів технологічних маршрутів та вибір найбільш раціонального

Вихідними даними для цього етапу є знання про типові схеми оброблення окремих поверхонь або їх груп. У практиці проектування укрупнені операції часто включають переходи, які неможливо виконати в одній установці, що потребує вибору підходу – диференціації чи концентрації операцій.

Під час розроблення маршрутного технологічного процесу необхідно враховувати такі положення:

- технологічний процес слід формувати за принципом послідовності, починаючи з чорнової обробки та завершуючи чистовими етапами;
- насамперед формують технологічні бази для наступних операцій;
- подальше оброблення виконують на поверхнях з найбільшими припусками, де застосовуються форсовані режими та значні сили різання;
- у проміжних переходах обробляють ділянки, на яких можливе виявлення внутрішніх дефектів заготовки;
- найвищу точність забезпечують на заключних операціях.

Для порівняння наведемо декілька можливих маршрутів та обґрунтуємо вибір оптимального.

Маршрут №1

005 – виготовлення заготовки (кування)

010 – термічна обробка

015 – випробування контрольних зразків

020 – токарне чорнове точіння

025 – токарне чистове точіння

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

030 – шліфування

035 – фрезерування

040 – слюсарні роботи

045 – координатно-розточувальна обробка

Маршрут №2

005 – виготовлення заготовки (кування)

010 – термічна обробка

015 – випробування контрольних зразків

020 – токарне чорнове точіння

025 – токарне чистове точіння

030 – фрезерування

035 – координатно-розточувальна операція

040 – шліфування

045 – слюсарні роботи

Маршрут №3

005 – виготовлення заготовки (кування)

010 – термічна обробка

015 – токарне чорнове точіння

020 – свердління

025 – шліфування

030 – випробування зразків

035 – токарне чистове точіння

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		32

040 – слюсарні роботи

045 – координатно-розточувальна операція

Обґрунтування вибору оптимального маршруту

Найбільш прийнятним є маршрут №2, оскільки у варіантах №1 та №3 фрезерування виконується до завершення чистових токарних операцій. Це призведе до виникнення ударних навантажень на різальний інструмент на наступних установках, що може спричинити поломки та дефекти поверхні.

Раціональність маршруту №2 зумовлена також тим, що точіння є продуктивнішим за шліфування, а оброблені токарними різцями поверхні мають стабільні параметри шорсткості, нижчі за значення, які утворюються під час шліфування. Точні зовнішні ділянки формуються до 6–7 квалітетів і мають шорсткість $Ra \approx 1,25$ мкм, що відповідає вимогам креслення.

Необхідні параметри точності та шорсткості забезпечують комплексом відповідних методів оброблення, розглянутих у попередньому підпункті.

Таблиця 2.1 – Варіанти обробки зовнішніх поверхонь

I варіант		II варіант	
1	Точіння чорнове, IT12, Ra 12,5	1	Точіння чорнове, IT12, Ra 6,3
2	Точіння напівчистове, IT10, Ra6.3	2	Точіння напівчистове, IT10, Ra 3,2
3	Точіння напівчистове, IT9, Ra3.2	3	Точіння чистове, IT9, Ra2,5
4	Точіння чистове, IT6, R0,63	4	Шліфування, IT6, 0,63

Для подальшого проектування приймаємо маршрут №2, оскільки у цьому варіанті шліфувальна операція забезпечує вищу продуктивність у порівнянні з альтернативними схемами. Найточніші лінійні параметри деталі виконуються за 9–10 квалітетами, тоді як інші – у межах 12-го квалітету. Шорсткість торцевих поверхонь 1, 14, 18 та 23 (див. рисунок 1.1) становить $Ra 2,5$ мкм, тоді як для решти поверхонь – $Ra 6,3$ мкм.

Для досягнення встановлених характеристик поверхні та точності необхідно виконати такі стадії оброблення:

Чорнове точіння – забезпечує точність на рівні 12-го квалітету та шорсткість Ra 6,3 мкм.

Напівчистове точіння – дозволяє отримати 10-й квалітет із шорсткістю приблизно Ra 3,2 мкм.

Чистове точіння – формує параметри 9-го квалітету та шорсткість Ra 2,5 мкм.

Для решти поверхонь, що мають вимоги 12-го квалітету та шорсткість Ra 6,3 мкм, достатньо виконати лише чорнову механічну обробку.

2.2 Обґрунтування вибору способу виготовлення вихідної заготовки

Спосіб отримання заготовки суттєво впливає на витрату матеріалу, точність подальших операцій та загальну трудомісткість виготовлення деталі. Тип заготовки визначається за результатами аналізу креслення, властивостей матеріалу, технічних вимог, обсягу виробництва, маси та габаритів, а також шляхом техніко-економічного зіставлення кількох можливих варіантів.

Для даної деталі можливі такі способи виготовлення заготовок:

- отримання заготовки з прокату;
- кування на молотах.

Враховуючи маршрут технологічного процесу, застосований у промисловому варіанті, для деталі типу «Вісь» передбачена вихідна заготовка у вигляді прокатного круглого профілю діаметром Ø210 мм та довжиною 2320 мм. Маса такої заготовки становить:

$$m = \rho \cdot V, \quad (2.1)$$

де ρ – густина заготовки, $\rho = 7,85 \text{ г/см}^3$; V – об'єм заготовки,

$$V = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{4}, \quad (2.2)$$

де d – діаметр заготовки, $d = 21 \text{ см}$; L – довжина, $L = 232 \text{ см}$.

$$V = 3,14 \cdot 21^2 \cdot 232 / 4 = 80315 \text{ см}^3, \quad (2.3)$$

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

тоді:

$$m_{\text{заг}} = 7,85 \cdot 80315 = 630,5 \text{ кг} \quad (2.4)$$

Собівартість прокату:

$$S_{\text{заг}} = M + C^{0.3}, \quad (2.5)$$

де M – затрати на матеріал заготовки:

$$M = Q \cdot S - (Q - q) S_{\text{отх}}/1000, \quad (2.6)$$

$S = 65$ грн. за кг матеріала;

$$M = 65 \cdot 630,5 - (630,5 - 416) 900/1000 = 40789 \text{ грн.} \quad (2.7)$$

$C^{0.3}$ – технологічна собівартість операцій правлення, розрізки на штучні заготовки визначаємо:

$$C^{0.3} = C_{\text{п.з.}} \cdot T_{\text{шт}} / 6000 \quad (2.8)$$

де $C_{\text{п.з.}}$ – приведені витрати на робочому місці правлення (16670 коп./год.), різки (12130 коп./год.); $T_{\text{шт}}$ – 160 штучний час виконання заготівельних операцій, хв.

$$C^{0.3} = (16670 + 12130) \cdot 160 / 6000 = 768 \text{ грн.} \quad (2.9)$$

$$S_{\text{заг}} = 40789 + 768 = 41557 \text{ грн.}$$

Оскільки деталь типу «Вісь» належить до відповідальних елементів, у вибраному технологічному процесі вихідну заготовку доцільно отримувати куванням на пресі з подальшим проведенням термічної обробки. Використовувана сталь 40Х не проявляє схильності до відпускнуї крихкості, що спрощує контроль її структурного стану.

Вихідними параметрами для визначення припусків є такі:

- спосіб нагрівання заготовки – індукційний;
- матеріал – сталь 40Х;
- маса готової деталі – 416 кг.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Припуски та граничні відхилення призначаємо відповідно до вимог ДСТУ 9182:2022:

– для діаметра $\varnothing 194$ мм встановлюється припуск 15 ± 3 мм, розмір заготовки – 209 ± 3 мм;

– для діаметра $\varnothing 172$ мм припуск становить 13 ± 3 мм, розмір заготовки – $185 \pm 2,5$ мм;

– для діаметра $\varnothing 130$ мм – 10 ± 2 мм, при цьому діаметр заготовки – 140 ± 2 мм.

Загальна довжина визначається:

$L = 2294 + 130 = 2424$ мм, з припуском $30/2 \pm 8,5$ мм, що дає розмір заготовки $2439 \pm 8,5$ мм.

Для окремих ділянок:

– при $l = 340$ мм припуск дорівнює 16 ± 4 мм, отже довжина заготовки – 356 ± 4 мм;

– при $l = 221$ мм припуск складає 15 ± 3 мм, що дає 236 ± 3 мм.

Визначення маси заготовки

Для кування на молотах приймаємо масу деталі з урахуванням поправочного коефіцієнта $K_p = 1,6$. Тоді маса заготовки визначається за залежністю:

$$m_{\text{заг.}} = 1,6 \cdot m_{\text{дет.}} = 500 \text{ кг}$$

Коефіцієнт використання заготовки:

$$K_z = m_{\text{дет.}} / m_{\text{заг.}} > 0,7, \quad (2.10)$$

де $m_{\text{дет.}}$ – маса деталі, кг; $m_{\text{заг.}}$ – маса заготовки, кг; $0,7$ – рівень технологічності.

$$K_z = 416 / 500 = 0,75.$$

					<i>KPMMTBA25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Таблиця 2.2 – Результати розрахунку заготовки

Номинальний розмір елемента деталі	Припуск	Допустимі відхилення розмірів заготовки, мм	Остаточний розмір елемента заготовки, мм
Ø 194	15	± 3	Ø 209 ± 3
Ø 172	13	± 3	Ø 185 ± 2,5
Ø 130	10	± 2	Ø 140 ± 2
2294	30	± 8,5	2439 ± 8,3
340	16	± 4	356 ± 4
221	15	± 3	236 ± 3

2.3. Розрахунок припусків на механічну обробку поверхні обертання

Здійснимо визначення припусків та встановимо розміри для оброблення циліндричної поверхні Ø130 кб.

Основна формула для визначення припуску на обробку зовнішньої циліндричної поверхні має такий вигляд:

$$2z_{\min} = 2(R_{z_{i-1}} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2}), \quad (2.13)$$

де: $R_{z_{i-1}}$ – параметр мікронерівностей поверхні, отриманої на попередній операції;

T_{i-1} – глибина дефектного шару після попереднього переходу;

ρ_{i-1} – просторове відхилення форми, що сформувалося на попередньому етапі;

ε_i – похибка, яка виникає на поточній операції.

Усі перелічені значення є табличними, окрім величини ρ_{i-1} , що визначається за залежністю:

$$\rho_{\text{заг(проксан)}} = \Delta_k l = 2439 \cdot 0,08 = 195 \text{ мкм}, \quad (2.14)$$

де Δ_k – загальне відхилення профілю, а коефіцієнт k_γ змінюється в межах 0,04–0,06 залежно від виду переходу.

Отже, для відповідних стадій обробки отримаємо:

– чорнової: $\rho_{1\text{чорн}} = 0,06 \times 195 = 12 \text{ мкм}$,

– напівчистової: $\rho_{1\text{нап}} = 0,05 \times 195 = 10 \text{ мкм}$,

– чистової: $\rho_{1\text{чист}} = 0,05 \times 195 = 10$ мкм,

– шліфувальної: $\rho_{1\text{шл}} = 0,04 \times 195 = 8$ мкм.

Вихідні дані, що застосовувалися для обчислень, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.3 – Вихідні данні

Найменування переходу	Точність	Граничні відхилення	Допуск Т, мм	Елементи припуску, мм				
				R_{z-1}	h_{i-1}	ρ_{i-1}	ϵ_y МКМ	
							ϵ_6	ϵ_3
–	Т3	± 2	300	300	12	100	200	800
Точіння чорнове	кв.14	-1,0	150	150	10	50	100	200
Точіння напівчистове	кв.10	-0,16	50	50	10	25	50	0
Точіння чистове	кв.8	-0,063	20	20	8	5	20	10
Шліфування	кв.6	+0,052 +0,025	300	300	12	100	200	–

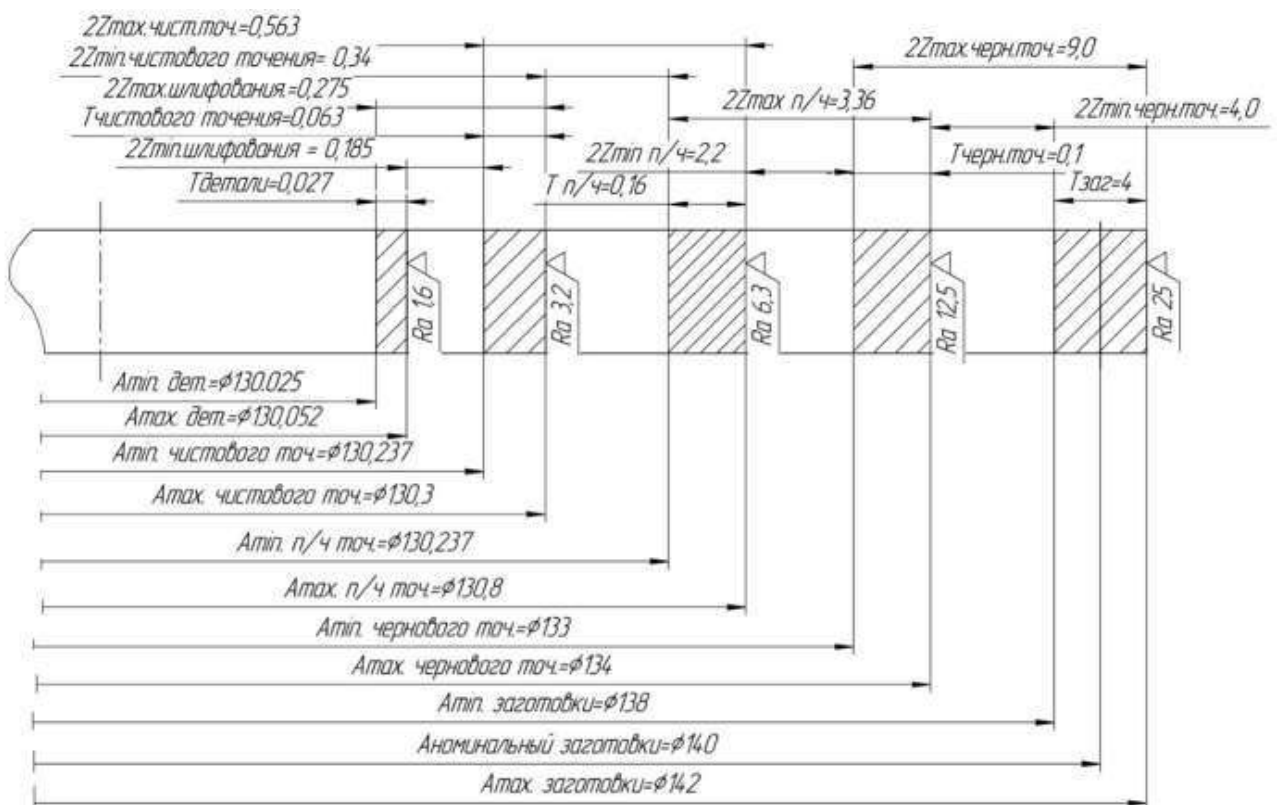


Рисунок 2.2 – Схема розміщення припусків на обробку діаметрального розміру $\varnothing 130$ к6 мм

Порівняння результатів, отриманих аналітичним розрахунком, із значенням, визначеним за нормативним стандартом, показує практично повну відповідність: за ДСТУ розмір становить 137 мм, тоді як аналітичний метод дає 136 мм. Відхилення є незначним, що свідчить про правильність виконаних обчислень.

2.4 Призначення та обґрунтування схем базування і закріплення

Існує значна кількість методів механічної обробки, які забезпечують однакові параметри точності та якості поверхонь, проте суттєво різняться за собівартістю, що робить їх ефективними для різних умов виробництва. Під час опрацювання деталі до неї висуваються вимоги щодо точності геометричних розмірів, чистоти обробки, взаємного положення поверхонь і забезпечення необхідних механічних властивостей матеріалу.

У процесі аналізу та вибору раціональної схеми базування й закріплення заготовки враховують фактори, що впливають на похибки. Одним із найпоширеніших джерел відхилень, які можуть спричинити брак, є похибка встановлення заготовки на робочому столі верстата, що безпосередньо впливає на точність подальших переходів.

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2}, \quad (2.15)$$

де ε_6 – похибка базування; ε_3 – похибка закріплення;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – похибка пристрою.

Розглянемо можливі похибки базування заготовки під час виконання горизонтально-розточувальної операції 025. На цьому етапі оброблення здійснюється у двох положеннях, що забезпечуються поворотом стола розточувального верстата. До складу операції входять фрезерування торця осі, формування паза, центрування, а також нарізання різьби у двох кріпильних отворах.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приблизно на 2,8 мм. Однак ця похибка буде повністю усунена на наступній токарній операції, оскільки подальша обробка виконуватиметься в центрах, що забезпечує формування діаметральних поверхонь від центрових отворів.

Обрана схема базування забезпечує подвійну напрямну та опорну бази, унаслідок чого заготовка позбавляється п'яти ступенів свободи. Вільною залишається лише можливість обертання навколо власної осі. За таких умов похибка базування для розміру $L = 221 \pm 0,575$ мм дорівнює нулю, оскільки технологічна та вимірювальна бази збігаються ($\epsilon_6 = 0$ мм).

Як альтернативу можна розглянути подібну схему базування, але з використанням інших опорних поверхонь. У цьому випадку похибка базування для розміру 221 мм дорівнюватиме допуску на розмір $2309 \pm 0,875$ мм, тобто $\epsilon_6 = 1,75$ мм. Через збільшення похибки застосування такої схеми є недоцільним.

Отже, перший варіант базування можна вважати найбільш обґрунтованим та раціональним.

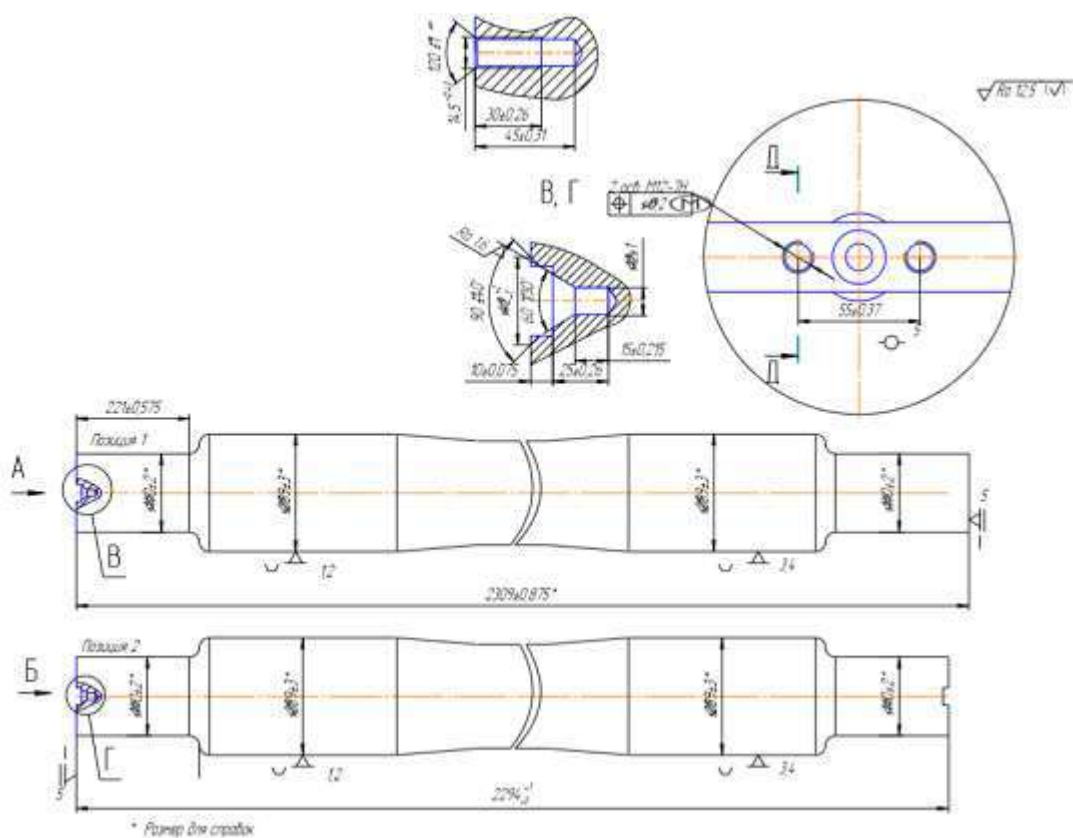


Рисунок 2.4 – Схема базування «Вісі» з упором в торець

										Арк.
										42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КРММТВА25.24356.000 ПЗ					

Розглянемо потенційну похибку встановлення заготовки під час виконання токарної операції 030 на верстаті з числовим програмним керуванням.

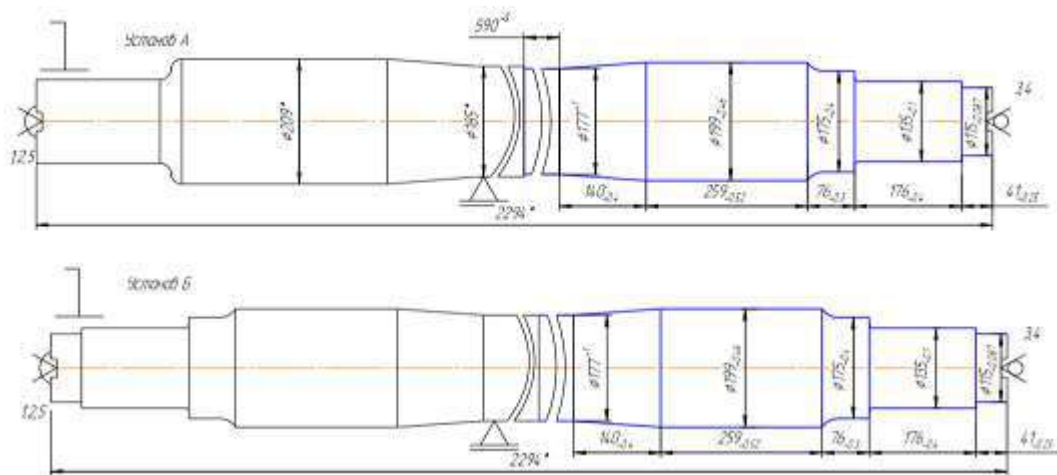


Рисунок 2.5 – Схема базування на токарній операції 030

Під час виконання цієї операції здійснюють чорнове точіння зовнішніх циліндричних поверхонь у двох установках, залишаючи припуск 2 мм на сторону для подальшого ультразвукового контролю. Найефективнішою схемою базування в цьому випадку є встановлення заготовки в плаваючому та обертовому центрах. Такий спосіб забезпечує подвійні напрямну та опорну бази, позбавляючи заготовку п'яти ступенів свободи, і залишає вільним лише обертання навколо осі.

За цієї схеми похибка базування для оброблюваних розмірів зводиться до допуску на параметр, що об'єднує вимірювальну та технологічну бази, тобто лівий і правий торці заготовки. Для лінійного розміру 2294 мм отримуємо $\varepsilon_{\delta} = 4$ мм. Щоб усунути цю похибку, необхідно коригувати нульову точку верстата для кожної деталі, орієнтуючись на правий торець.

Розглянемо також варіант базування у жорсткому та обертовому центрах. За принципом фіксації заготовки ця схема аналогічна попередній, однак у сумарну похибку додатково входить похибка зацентрування, що становить $\varepsilon_{\psi} = 0,2$ мм. Таким чином, загальна похибка складатиме $\varepsilon_{\delta} = 4 + 0,2 = 4,2$ мм, що перевищує значення, отримане для першої схеми (див. рис. 2.3).

					KPMMTBA25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Встановлення в центрах дає змогу реалізувати принцип сталості баз, тобто виконувати чорнову, чистову токарну та остаточну круглошліфувальну обробку з опорою на одні й ті самі центрові отвори. Це дозволяє мінімізувати похибки, пов'язані з установленням і фіксацією заготовки, зокрема ті, що виникають через можливу несумісність базових та оброблюваних шийок.

2.5 Обґрунтування та вибір моделей металорізального обладнання

Операція 025 – горизонтально-розточна обробка на верстаті з ЧПК.

У виробничих умовах деталь типу «Вісь» опрацьовується на горизонтально-розточному верстаті 2650Ф1. Вибір саме цієї моделі зумовлений значними габаритами заготовки та розмірами поворотного столу. Оскільки виготовлення «Вісі» здійснюється у дрібносерійному виробництві, пріоритет надавався універсальному обладнанню з числовим програмним керуванням. Це дозволяє обробляти широкий спектр деталей за мінімального переналагодження, скоротити машинний час та зменшити вплив людського фактора.

Нижче наведено основні технічні характеристики верстата 2650Ф1:

тип компоновки – В;

діаметр виносного шпинделя – 160 мм;

кріплення інструмента – конус метричний 80;

розмір поворотного столу – 2240×3500 мм;

максимальна маса заготовки – 16 000 кг;

переміщення:

вертикальне шпиндельної бабки – 2500 мм,

хід шпинделя – 1250 мм,

радіальний супорт – 250 мм,

переміщення столу – 1250 мм;

кількість швидкостей шпинделя – 23;

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

частота обертання – 4–800 об/хв;

подачі: шпинделя – 1,25–1250 мм/хв, шпиндельної бабки – 0,8–800 мм/хв,
стола – 0,8–800 мм/хв;

потужність приводу головного руху – 36 кВт;

габаритні розміри: 11600×11650×6700 мм;

маса верстата – 76400 кг.

Для порівняння розглянемо універсальний горизонтально-розточний верстат моделі 2636, який застосовувався раніше. Його можливості значно обмежені з огляду на відсутність ЧПК, що підвищує ймовірність похибок оператора, збільшує допоміжний час та знижує повторюваність обробки.

Основні характеристики верстата 2636:

тип компоновки – А;

діаметр шпинделя – 125 мм;

конус для інструмента – метричний 80;

поворотний стіл – 1600×1800 мм;

максимальна маса заготовки – 8000 кг;

переміщення:

шпиндельна бабка – 1400 мм,

хід шпинделя – 1000 мм,

радіальний супорт – 200 мм,

переміщення стола – 1600×1800 мм;

частота обертання шпинделя – 6,3–1000 об/хв;

подачі: шпинделя – 1,6–1600 мм/хв, стола – 1–1000 мм/хв;

потужність головного приводу – 19 кВт;

габарити: 8160×5070×4805 мм.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

Порівняльний аналіз свідчить, що верстат 2650Ф1 є більш придатним для обробки габаритної та масивної деталі «Вісь», забезпечує вищу продуктивність, точність позиціонування та стабільність обробки.

Операція 030 – токарна обробка на верстаті з ЧПК.

На даному етапі здійснюється чорнове точіння всіх зовнішніх циліндричних поверхонь осі з формуванням припусків під подальшу чистову обробку.

Вибір металорізального обладнання.

У виробничих умовах деталей типу «Вісь» зазвичай обробляють на універсальному токарно-гвинторізному верстаті 16К25. Однак для підвищення стабільності та точності обробки доцільно застосувати сучасний верстат з ЧПУ. Після аналізу доступних моделей оптимальним варіантом визначено 1М63БФ101 (з подовженою станиною), що оснащений системою числового програмного керування.

Основні аргументи на користь цього обладнання такі:

Технологічні можливості. Верстат забезпечує виконання всіх необхідних токарних переходів та підтримує використання різального інструмента відповідних типорозмірів.

Потужність приводу. Двигун потужністю 15 кВт повністю покриває потреби чорнового точіння масивних поверхонь вісі.

Робочий простір. Можлива обробка заготовок діаметром до 350 мм і довжиною до 2800 мм, що відповідає габаритам «Вісі».

Тип виробництва. Для дрібносерійного виготовлення універсальний токарний верстат із ЧПК є найбільш раціональним рішенням.

Основні технічні параметри моделі 1М63БФ101:

максимальний діаметр над станиною – 630 мм, над супортом – 350 мм; найбільша довжина заготовки – 2800 мм; діапазон метричних різьб – 1–224 мм;

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

поздовжні подачі – у широкому діапазоні робочих значень; потужність приводу головного руху – 15 кВт.

Операція 055 – круглошліфувальна.

На цій операції виконується шліфування шийок осі під роликові підшипники букс.

Вибір обладнання. З урахуванням технічних вимог і габаритів деталі для операції обрано круглошліфувальний верстат 3М194, який забезпечує необхідну точність та стабільність обробки.

Обґрунтування вибору:

Можливості обробки. Верстат дозволяє шліфувати деталі довжиною до 4000 мм та діаметром до 400 мм, що повністю відповідає розмірам «Вісі».

Потужність. Електродвигун потужністю 25 кВт гарантує необхідний запас продуктивності при шліфуванні масивних поверхонь.

Виробнича доцільність. У дрібносерійних умовах напівавтоматична модель 3М194 є оптимальним варіантом завдяки універсальності та простоті переналагодження.

Комплектація. Конструкція дозволяє встановлювати один шліфувальний круг, чого достатньо для обробки шийок з двох установів.

Паспортні дані верстата 3М194:

тип компоновки – А;

максимальний діаметр деталі – 350 мм;

розмір стола – 4000×1000 мм;

максимальна довжина шліфування – 4000 мм;

найбільше переміщення стола – 4240 мм;

мінімальна поділка лімба – 0,005 мм;

частота обертання заготовки – 12–120 об/хв;

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

частота обертання круга – 600–1300 об/хв;

потужність приводу – 25 кВт;

габарити: 14065×3615×2450 мм;

маса – 34 600 кг.

2.6 Обґрунтування та вибір пристроїв, інструменту й обладнання контролю

З огляду на дрібносерійний характер виготовлення найраціональніше застосовувати універсально-складальні пристосування (УСП) відповідно до вимог ДСТУ. Це забезпечує оперативне переналагодження та можливість адаптації оснащення під типорозмірні варіації деталей.

Операція 025 – горизонтально-розточна з ЧПК.

Для виконання переходів використовують спеціалізовані пристрої та такий ріжучий інструмент:

торцева фреза 2214-0271, пластини твердосплавні Т15К6;

кінцева фреза 1524-2356 зі швидкорізальної сталі Р6М5;

свердла 2301-0409 та 2301-0400 зі сталі Р6М5;

зенківки 0356-7893, 0356-7862, 0356-7925;

мітчик 035-2620-0510.

Засоби вимірювання:

рулетка 3000 мм;

штангенциркуль ШЦ-I-125-0,1;

спеціальний шаблон;

калібр-пробка М12-7Н ПР/НЕ.

Допоміжні елементи:

оправки 6221-0033 та 6221-0052;

різьбові патрони 191221030;

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

спеціальні технологічні пристрої для фіксації заготовки.

Операція 030 – токарна обробка на ЧПУ

Для базування та закріплення деталі застосовуються:

плаваючий центр А-1-5-У;

обертовий центр А-1-7-У;

повідковий патрон МН4050-62.

Різальний інструмент:

різець PERBR2525L12 із пластиною Т5К10, що використовується для чорнових переходів.

Позначення включає:

Р — схема кріплення (важільний підтиск);

Е — ромбічна форма пластини з вершинним кутом 75° ;

Р — головний кут у плані 75° ;

В — задній кут 5° ;

L — виконання праве;

2525 — переріз державки 25×25 мм;

12 — довжина різальної кромки 12 мм.

Контрольно-вимірювальні засоби:

штангенциркулі ШЦ-ІІ-320-0,1 та ШЦ-ІІ-600-0,1.

Операція 055 — круглошліфувальна

Для обробки шийок осі під буксові підшипники застосовують:

жорсткий центр А-1-4-У;

підтримувальний хомутик.

Шліфувальний інструмент:

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

круг ПП 600×100×127 24АМ20 СМ23 К1 40 м/с, 2 клас А, виконаний з титановмісного електрокорунду марки 24А на керамічній зв'язці.

Контрольні засоби:

мікрометр 100–150 мм, що забезпечує перевірку діаметральних розмірів шийок у дрібносерійному виробництві.

2.7 Проектування верстатного пристрою

Обґрунтування необхідності створення оснащення.

Розроблення раціонального пристрою для фрезерної операції на обладнанні з ЧПК є складовою підвищення ефективності оброблення. Рівень технологічного забезпечення безпосередньо впливає на продуктивність, економію матеріальних і енергетичних ресурсів, стабільність параметрів якості та надійність функціонування виготовленої продукції. Для подальшого розвитку машинобудування важливим є впровадження удосконалених процесів, модернізація традиційних методів та впровадження механізованих систем зміцнення й обробки деталей.

Прискорений перехід до автоматизованого устаткування з числовим програмним керуванням дозволяє поступово зменшувати обсяг ручних операцій. Сучасні верстати з ЧПК, побудовані на базі мікропроцесорних систем, здатні замінювати кілька одиниць універсального обладнання, що сприяє скороченню трудових витрат і підвищенню точності. В області механообробки це забезпечує значне вивільнення персоналу, а також покращує ергономічні та санітарні умови праці.

Причини застосування спеціалізованого пристрою.

У базовому технологічному процесі торці оброблялися на універсальних розточувальних верстатах. Під час удосконалення маршруту запропоновано замінити їх на горизонтально-розточувальний комплекс моделі 2560Ф1.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

Використання автоматизованого обладнання разом із пневмопривідним пристосуванням забезпечує:

суттєве скорочення основного часу завдяки автоматичному позиціонуванню шпинделя;

підвищення стабільності точності за рахунок повторюваності налаштувань;

зниження кваліфікаційних вимог до оператора;

зменшення трудомісткості;

підвищення продуктивності та покращення безпечності робочого процесу.

Координатна система пристрою повністю узгоджується з координатами багатоопераційного верстата з ЧПК.

Уточнення мети операції та характеристик точності.

Метою фрезерної операції є отримання геометрично точного торця, паза та допоміжних елементів, передбачених конструктором. Згідно з технічними вимогами:

для невказаних граничних відхилень застосовуються рекомендації H14, h14 та IT14/2;

торцева поверхня має розмір 2294 мм;

глибина паза становить 10–1 мм;

ширина паза дорівнює $31+0,34$ мм.

Граничні відхилення для діаметральних і лінійних параметрів визначені за таблицями довідника. Монтажні різьбові отвори M12-7H та центрові елементи не потребують розгляду через відсутність жорстких вимог – вони не належать до відповідальних.

Отримані допуски відповідають таким квалітетам точності:

2294 мм – орієнтовно 14-й;

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
						52
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10–1 мм – приблизно 16-й;

31+0,34 мм – близько 13-го.

Для кутових параметрів, непозначених на кресленні, застосовується допуск $\pm AT16/2$, що еквівалентно $\pm 30'$.

Точність форми та взаємного розташування.

Найточнішим лінійним розміром на даному переході є ширина паза 31+0,34 мм. Конструктор не визначає вимоги до прямолінійності, тому допускається орієнтовне значення – 60% від допуску, тобто:

$$T = 0,6 \cdot 0,34 = 0,204 \text{ мм} \approx 0,2 \text{ мм} ,$$

$$T=0,6 \cdot 0,34=0,204 \text{ мм} \approx 0,2 \text{ мм}, \text{ що відповідає 14-му ступеню точності.}$$

Допуск симетричності бічних поверхонь паза становить 0,1 мм, що відповідає 10-му ступеню точності.

Шорсткість оброблених поверхонь:

бічні стінки паза: $R_a = 6,3$ мкм;

дно паза: $R_a = 12,5$ мкм.

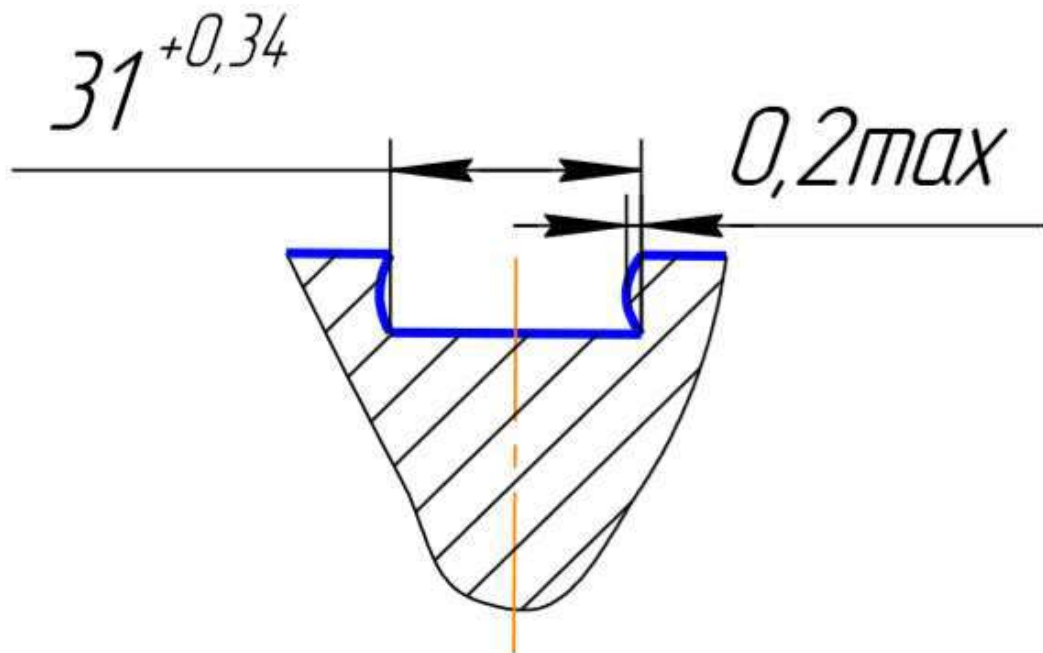


Рисунок 2.8 – Приклад відхилення бічної поверхні паза від площинності

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		53

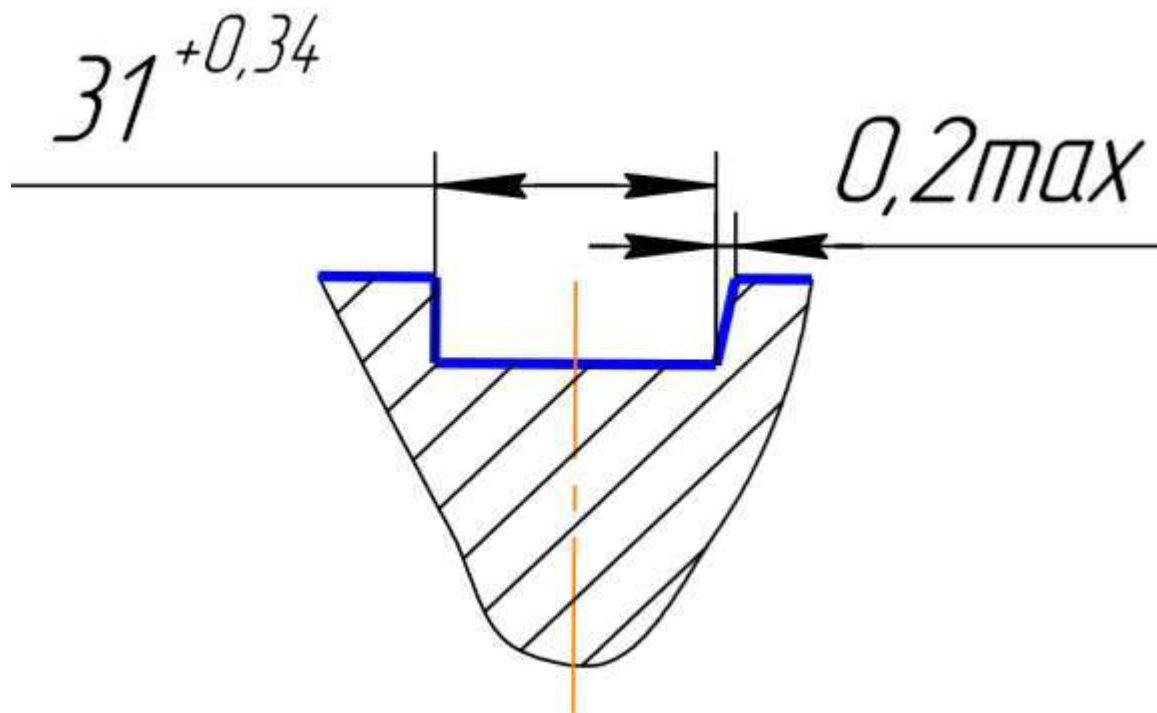


Рисунок 2.9 – Приклад відхилення бічної поверхні паза від симетричності

Уточнення кількісних та якісних характеристик заготовки, що надходить на операцію 65.

На горизонтально-розточувальну операцію заготовка подається після виконання кувалдної стадії, під час якої формується поковка відповідно до геометрії, наведеної на рисунку 3. Перед передачею на механообробку від напівфабрикату відрізають контрольну пробу для визначення механічних властивостей. Цей етап виконується у лабораторії на стрічкопиляльному устаткуванні, що призводить до зменшення початкової довжини, і заготовка надходить із розміром $2324 \pm 8,5$ мм.

У межах даної операції здійснюється комплекс оброблювальних переходів:

фрезерування торця;

формування монтажної канавки;

центрування заготовки;

свердління отворів кріплення.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Для поверхні $\varnothing 140 \pm 2$ мм толеранс циліндричності та профілю поздовжнього перерізу визначається як 30% від допустимого поля:

$$T = 0,3 \cdot 4 = 1,2 \text{ мм} = 1200 \text{ мкм},$$

$$T=0,3 \cdot 4=1,2 \text{ мм}=1200 \text{ мкм},$$

що також відповідає 16-му ступеню. Схеми відхилень від циліндричності і профілю наведені на рисунках 4 та 5.

Точність взаємного розташування

Перпендикулярність торця щодо осі заготовки приймається за формулою:

$$T = 0,6 \cdot 6 = 3,6 \text{ мм},$$

$$T=0,6 \cdot 6=3,6 \text{ мм},$$

після уточнення – 2 мм (16-й ступінь).

Співвісність циліндричної поверхні $\varnothing 140 \pm 2$ мм становить приблизно 3 мм, що також належить до 16-го ступеня.

Шорсткість поверхні

Після кування параметр шорсткості становить $R_a = 50$ мкм, що є типовим для поковок важкого габариту.

Умови виготовлення та експлуатації запроєктованого пристосування.

Запланований річний обсяг – 100 деталей, що відповідає малосерійному виробництву. За такту близько 470 хв обладнання працюватиме з високою інтенсивністю. За весь термін служби 5 років (60 місяців) пристосування повинно забезпечити не менше 5000 циклів.

Верстат має систему охолодження, стружку видаляє робітник після зупинки обладнання. Обслуговування пристосування виконує оператор 4-го розряду. Захисний кожух верстата запобігає потраплянню МОР та стружки на персонал.

Функції, що реалізуються пристосуванням

Переміщення та первинна орієнтація заготовки.

Базування.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

- Фіксація заготовки.
- Орієнтування пристрою на верстаті.
- Закріплення пристосування.
- Підведення/відведення енергоносія.
- Створення стискальної сили.
- Керування енергоносієм.
- Виконання обробки.
- Забезпечення безпечних умов праці.
- Інтеграція функціональних вузлів.

Під час реалізації наведених функцій доцільно використовувати перевірені технічні рішення, стандартизовані елементи та устаткування. Розроблення нових конструкцій вузлів допускається лише за умови необхідності та технічного обґрунтування.

Вибір схеми базування

Одним із ключових джерел похибок є некоректне встановлення заготовки на робочій поверхні верстата, тому правильний вибір базових поверхонь є критичним для забезпечення точності виконуваної операції.

$$\varepsilon_y = \sqrt{\varepsilon_6^2 + \varepsilon_3^2 + \varepsilon_{\text{пр}}^2}, \quad (2.17)$$

де ε_6 – похибка базування; ε_3 – похибка закріплення;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – похибка пристрою.

Аналіз можливої похибки базування заготовки на даній операції.

Під час виконання операції заготовка проходить оброблення у двох просторових положеннях, що реалізуються шляхом повороту стола горизонтально-розточувального верстата. До циклу входять такі переходи: формування торця, фрезерування паза, центрування, а також нарізання різьби в монтажних отворах.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найдоцільнішим способом устанавлення є базування у призмах з торцевим упором. За такої схеми лінійні параметри $L = 2309 \pm 0,875$ мм та $L = 2294$ мм повністю залежать від точності позиціонування столу, оскільки технологічна та вимірювальна бази збігаються, тобто $\varepsilon_6 = 0$. Інші розмірні елементи – глибини отворів і параметри паза – також визначаються точністю переміщення верстата, адже прив'язані до одного торця, що обробляється з певної позиції.

У радіальному напрямку похибка базування розраховується за відповідною формулою, що враховує відхилення центрування.

$$\varepsilon_6 = \frac{T_{140}}{2} \frac{1}{\sin \alpha} = \frac{4}{2} \frac{1}{\sin 45} = 2,8 \text{ мм.} \quad (2.18)$$

За такої схеми встановлення виникає зміщення центрального отвору відносно осі зовнішньої циліндричної поверхні приблизно 2,8 мм (див. рис. 2.11). Однак ця похибка усувається на наступній токарній операції, оскільки подальша обробка виконуватиметься в центрах, і всі діаметральні поверхні формуються відносно осі, що задається центровими отворами.

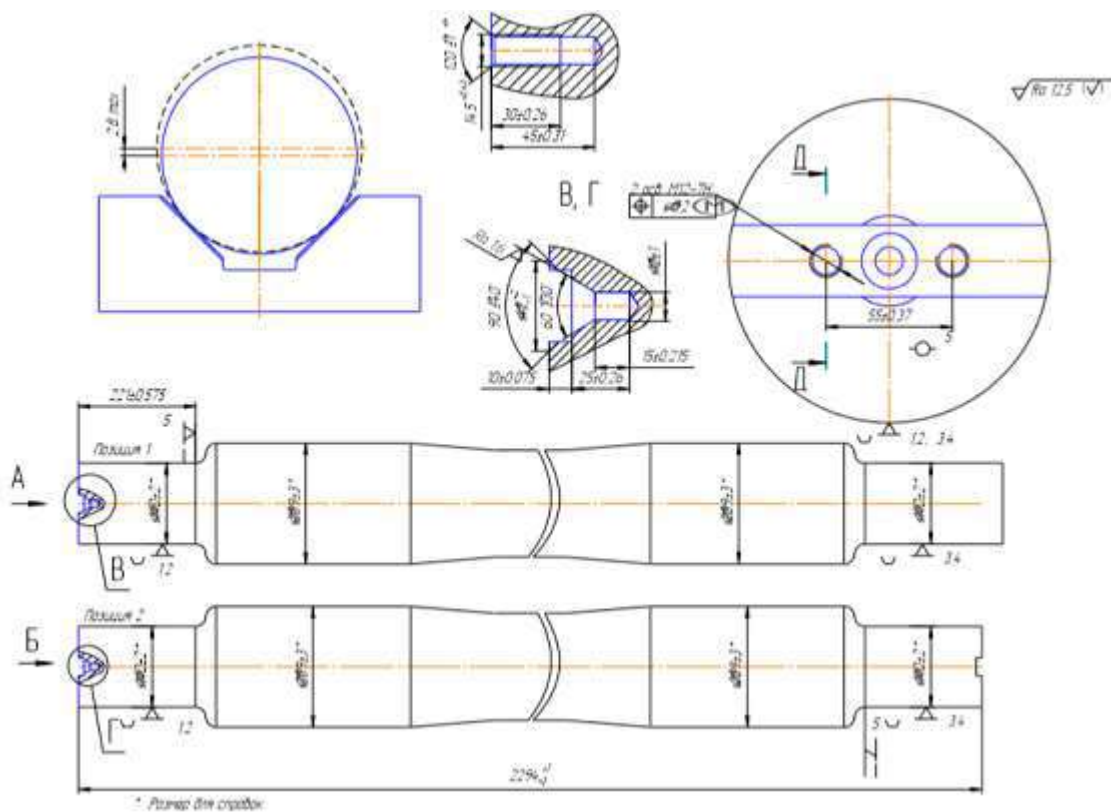


Рисунок 2.11 – Схема базування на горизонтально розточній операції

Запропонована схема базування використовує подвійну напрямну та опорну бази, що забезпечує фіксацію заготовки з усуненням п'яти ступенів свободи; відкритою залишається лише можливість обертального переміщення навколо власної осі. За таких умов похибка встановлення для розміру $L = 221 \pm 0,575$ мм дорівнює нулю, оскільки технологічна та вимірювальна бази повністю збігаються, тобто $\varepsilon_{\delta} = 0$.

Для паза похибка також відсутня ($\varepsilon_{\delta} = 0$), адже потенційне радіальне зміщення, яке може вплинути на ширину 34 мм, буде усунуте під час подальших токарних переходів. На цих операціях заготовка встановлюється в тих самих центрах, сформованих у єдиному встановленні разом із пазом, що гарантує коректну співвісність та нівелює можливі відхилення вихідного базування.

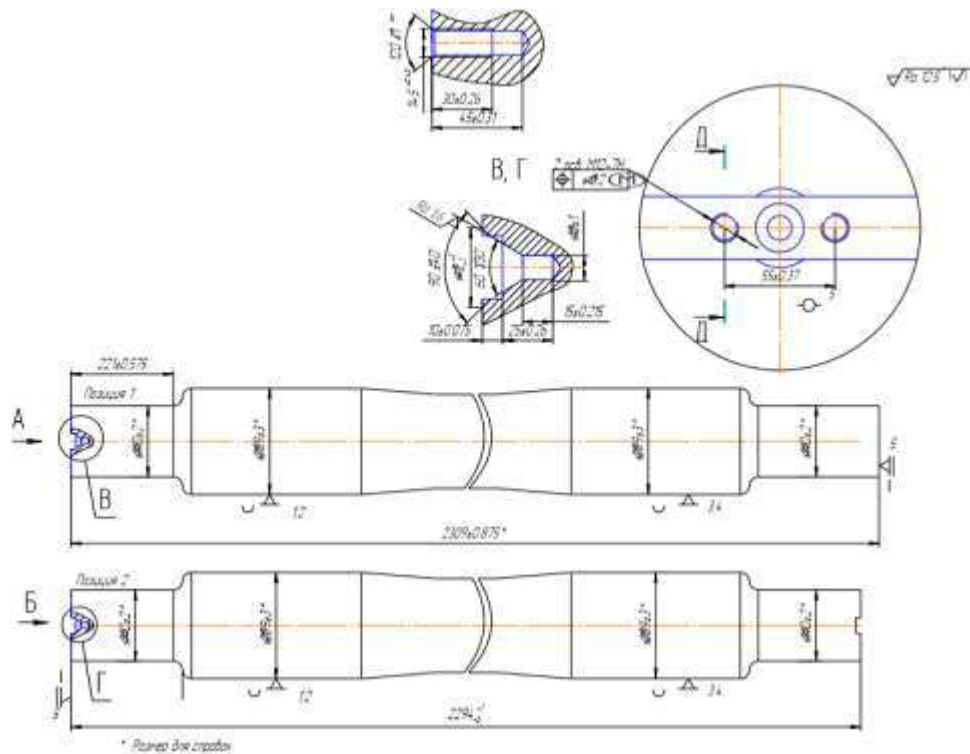


Рисунок 2.12 – Схема базування «Вісі» з упором в торець

Як альтернативу можна розглянути схему базування, подібну за принципом, але реалізовану через інші опорні та напрямні поверхні (див. рисунок 2.12). У такій конфігурації похибка встановлення для розміру 221 мм дорівнюватиме допуску на довжину $2309 \pm 0,875$ мм, тобто $\varepsilon_{\delta} = 1,75$ мм. Через

значну величину відхилення використання цієї схеми є недоцільним. Відтак, перший варіант базування залишається найбільш обґрунтованим і технологічно раціональним.

2.8 Висновки за розділом

У межах розділу, присвяченого модернізації технологічного процесу виготовлення осі, як вихідну заготовку обрано поковку, отриману на пресовому обладнанні, оскільки цей метод є економічно доцільнішим порівняно з куванням на молотах. У ході роботи здійснено аналіз чинного заводського маршруту механічної обробки, після чого запропоновано низку конструктивних та організаційних удосконалень: оптимізовано послідовність операцій, а універсальні верстати замінено на комплекси з числовим програмним керуванням, що забезпечує підвищення продуктивності та стабільності параметрів точності.

Проведено детальне дослідження схем базування й закріплення заготовки під час ключових переходів, визначено відповідні похибки та оцінено їхній вплив на точність формоутворення. Аналітичним методом розраховано припуски для відповідальних поверхонь, виконано вибір верстатів, оснащення, необхідних інструментів і режимів різання, а також здійснено технічне нормування операцій.

Розроблено спеціалізований верстатний пристрій для горизонтально-розточувальної операції на ЧПК, оснащений пневматичним приводом, що дозволяє зменшити допоміжний час, стабілізувати умови фіксації заготовки та підвищити надійність технологічного процесу. На основі виконаних розрахунків сформовано повний комплект технологічної документації.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

3. НАУКОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ

3.1 Теоретичні засади поверхнево-пластичного деформування

Поверхнево-пластичне деформування (ППД) застосовується як один із найефективніших методів зміцнення деталей, що працюють під дією змінних навантажень. Його основна мета – підвищення опору втомі, збільшення твердості приповерхневого шару та формування у ньому залишкових стискуючих напружень, а також створення контрольованого мікрорельєфу. Зазвичай ППД проводять як завершальний етап технологічного процесу, після чорної абразивної обробки.

У результаті деформування поверхні за рахунок локального тиску роликів зростає опір матеріалу пластичній деформації, покращується втомна міцність та підвищується поверхнева твердість. Водночас дещо зменшується пластичність металу. Обкатування здійснюється вільнообертливими роликами (одним або декількома), які взаємодіють із поверхнею заготовки під дією радіального зусилля. У зоні контакту відбувається інтенсивний наклеп, вирівнювання мікронерівностей та згладжування виступів після попередніх різальних переходів. Це забезпечує покращення чистоти поверхні на 2–3 класи, а також незначне зменшення діаметра деталі.

Обкатування циліндричних ділянок найчастіше виконують на токарних або револьверних верстатах, плоских поверхонь — на стругальному обладнанні. Для масивних або відповідальних виробів (наприклад, елементів колісних пар) застосовують спеціалізовані установки. Конструкція пристрою для ППД визначається параметрами верстата, геометрією деталі, кількістю роликів та їхньою конфігурацією.

Кількість роликів добирають залежно від жорсткості деталі та призначення процесу. Накатку одним роликом використовують лише для достатньо жорстких заготовок, оскільки вона створює значне одностороннє радіальне навантаження, що може спричинити прискорений знос вузлів верстата та деформацію деталі, а

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

Діаметр і ширину роликів визначають переважно з конструктивних міркувань, однак для деталей діаметром до 75 мм рекомендують дотримуватися співвідношення «діаметр ролика / діаметр деталі» не більше ніж 4. Із зростанням діаметра заготовки це відношення має поступово зменшуватися. У незагартованих сталях зміцнення формується внаслідок структурних перетворень та зміни дефектності кристалічної решітки — зміни густини дислокацій, кількості вакансій, перерозподілу блоків та виникнення локальних напружень. При зміцненні загартованих сталей, окрім зазначеного, спостерігається часткове перетворення залишкового аустеніту в мартенсит та виділення дрібнодисперсних карбідів.

Поверхнева пластична деформація спричиняє утворення зсувів у межах зерен, пружне викривлення кристалічної решітки та зміну конфігурації та розмірів зерен. Інтенсивність наклепу тим вища, чим менш тверда сталь. У незагартованих сталях твердість поверхневого шару може зростати до 80 %, у загартованих — приблизно до 30 %, при глибині зміцнення 1...2 мм. Доведено, що обкатування зразків, наплавлених пружинним дротом 2-го класу, суттєво підвищує їхню витривалість. Отже, операцію поверхнево-пластичного деформування доцільно обов'язково включати до технології відновлення деталей, що працюють під циклічними навантаженнями. Зростання втомної міцності пояснюється формуванням у приповерхневому шарі стискуючих напружень, які компенсують негативний вплив структурної неоднорідності та дефектів наплавленого металу.

Установка для накатування монтується на напрямних поперечної подачі супорта токарного верстата. Конструктивно вона складається (див. рис. 3.2) із двох накатних роликів 2 і 4, закріплених на зварних кронштейнах 1 і 5. Лівий і правий кронштейни з'єднані з проміжними плитами 12, оснащеними напрямними клинами 11, які забезпечують кріплення на напрямних супорта. Обидва кронштейни зв'язані двома тягами 10, один кінець яких закріплено на

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

лівому кронштейні, а інший – через траверсу 9 – з'єднаний зі штоком гідроциліндра 8. Гідроциліндр двосторонньої дії шарнірно встановлений на осі 7 правого кронштейна.

Подача штока гідроциліндра забезпечує переміщення кронштейнів із роликками по напрямних супорта, здійснюючи їх підведення та притиск до заготовки або відведення після обробки. Привід гідроциліндра працює від окремої гідростанції, а напрям руху визначається золотником керування. Зусилля притиснення регулюється на гідростанції та контролюється за манометром 6, встановленим на передній кришці гідроциліндра.

Деталь 3 встановлюють на токарний верстат. Рукояткою подачі установку наближають до шийки осі, вмикають обертання деталі, а потім – гідропривід. Ролики під тиском деформують поверхню обертової осі. Після цього включають поздовжню подачу і здійснюють накатку по всій довжині шийки. Після завершення – гідропривід вимикають, ролики відводять, обертання зупиняють і деталь знімають. Унаслідок накопчення зростає твердість і зменшується шорсткість поверхні.

В українському машинобудуванні спостерігається активна технологічна модернізація, спрямована на підвищення ефективності виробництва та конкурентоспроможності продукції. Запровадження сучасних технологій здебільшого відбувається за рахунок придбання імпортного обладнання та інструменту, хоча перспективним є і розвиток власних технологічних рішень. Нині особлива увага приділяється високотехнологічним галузям, орієнтованим на дрібносерійне виготовлення продукції, а також удосконаленню масових виробництв, від стабільності яких залежить якість продукції широкого вжитку.

Ще однією ключовою тенденцією розвитку машинобудівних технологій є зростання вимог до екологічності процесів – зниження енергоємності, мінімізація використання мастильно-охолоджувальних рідин і підвищення економічності. У цьому контексті методи поверхнево-пластичного

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деформування, особливо ті, що виконуються без застосування МОР, є значно безпечнішими та екологічнішими порівняно з абразивною фінішною обробкою.

Для галузей із високими вимогами до стабільності та довговічності процесу (наприклад, автомобілебудування), основним завданням є забезпечення гарантованої точності та стабільної якості при виготовленні величезних обсягів деталей – до сотень тисяч одиниць на рік. Відсутність прямого втручання оператора вимагає глибокого дослідження процесу ППД та відпрацювання параметрів, що забезпечують точність форми, шорсткість і необхідні характеристики зміцненого шару.

Процеси поверхневого зміцнення на основі ППД продовжують активно розвиватися як високоефективний метод фінішної обробки деталей машин. Сутність технології полягає у контактній взаємодії деформуючого інструмента з поверхнею заготовки під дією прикладених сил у процесі їх відносного руху.

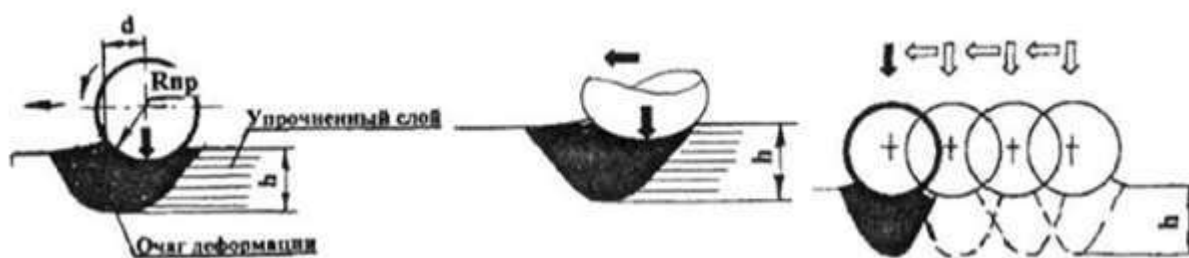


Рисунок 3.2 – Основні варіанти взаємодії деформуючого елемента з оброблюваною поверхнею включають: а) кочення; б) ковзання; в) локальне вдавлювання.

Процес поверхнево-пластичного деформування (ППД) реалізується без утворення стружки шляхом зміни мікрорельєфу та пластичного деформування приповерхневих шарів матеріалу. У результаті істотно знижується шорсткість, формується зміцнений шар із залишковими напруженнями стиску, а також інтенсивно згладжуються нерівності, що залишилися після попередніх етапів обробки. ППД виключає можливість втирання в поверхню абразивних частинок, сприяє формуванню впорядкованого мікрорельєфу та забезпечує значне підвищення якості поверхневого шару.

Поєднання високої продуктивності, простоти реалізації та стабільності процесу обумовило широке використання ППД як фінішної операції в різних галузях промисловості. Наукові дослідження, наведені у спеціальній літературі, спрямовані на встановлення загальних закономірностей цього процесу та уточнення особливостей його застосування для різних конструкцій деталей.

Згідно з ДСТУ, залежно від характеру силової дії деформуючого елемента на поверхню деталі, виділяють вісім основних груп процесів ППД. Найбільш розповсюджені набули статичні методи, до яких належать дорнування, вигладжування та обкатування. Для цих процесів характерне безперервне контактне взаємодіяння інструмента із заготовкою при їх відносному русі. Статичні методики застосовуються найчастіше через їх технологічну простоту, надійність та передбачуваність результатів.

Одним із найпоширеніших способів ППД є вигладжування, що відзначається високою продуктивністю та великою довговічністю інструмента. Після вигладжування можна досягти шорсткості $Ra = 0,32 \dots 0,1$ мкм, при цьому зростає мікротвердість поверхневого шару та створюються стискуючі залишкові напруження.

Алмазне вигладжування за кінематикою подібне до процесу точіння, однак замість різця застосовується алмазний деформуючий елемент, який пластично змінює поверхневий шар, забезпечуючи його додаткове зміцнення.

Надійність і довговічність машин та агрегатів значною мірою визначаються властивостями їхніх найбільш навантажених поверхонь. Незалежно від характеру зовнішніх впливів, саме приповерхневі шари деталей зазнають максимальних навантажень та інтенсивної взаємодії із зовнішнім середовищем. Кінцеві експлуатаційні характеристики цих шарів формуються передусім технологією їх обробки. ППД є одним із найефективніших методів підвищення якості та міцності поверхневих шарів деталей.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Експериментальні дослідження свідчать про значний практичний ефект ППД. Так, у роботі Одинцова Л.Г. виявлено, що після пробігу 43 000 км спрацювання поршневих пальців, оброблених алмазним вигладжуванням, було на 60–93 % меншим порівняно з необробленими аналогами.

У дослідженнях Бараца Я.І. запропоновано застосування ППД з формуванням регулярного мікрорельєфу для покращення характеристик контактуючої пари «поршень — корпус». При дослідно-промисловій перевірці аналізувались вплив режимів ППД на герметичність, прирабовуваність та зносостійкість поверхонь.

Шнейдер Ю.Г. у своїх роботах показав, що найефективнішим для цього типу деталей є частково регулярний мікрорельєф із дотичними канавками, який забезпечує оптимальні експлуатаційні властивості.

У праці Горохова В.А. наведено результати досліджень зносостійкості та прирабовуваності зразків із технічного титану ВТ1-1 після їх оброблення різними методами: віброобкочуванням, класичним обкочуванням, притиранням та шліфуванням. Експеримент показав, що поверхні, сформовані методами ППД, демонструють удвічі менший початковий знос порівняно з традиційними видами обробки. Таким чином, загальне підвищення зносостійкості титанових сплавів становить близько 55% завдяки оптимізації геометричних параметрів і приблизно 45% – внаслідок удосконалення фізичних характеристик поверхневого шару, сформованого методами ППД.

Серед деталей, що працюють у вузлах тертя, особливе місце займають гумометалеві пари, наприклад шийки валів, які контактують з елементами ущільнення. Для порівняння ефективності різних способів фінішної обробки (шліфування, полірування та алмазне вигладжування) були проведені випробування зразків зі сталі 40Х на машині тертя. Результати довели, що поверхні, оброблені алмазним вигладжуванням, мають знос у 1,5–2 рази менший порівняно з поліруванням, і у п'ять разів менший – порівняно зі шліфуванням.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

Підвищення ресурсу опор бурових доліт та різьбових з'єднань бурильних труб забезпечується застосуванням комбінованої деформаційно-електрохімічної обробки, під час якої одночасно формується ППД-шар і наноситься твёрдо-мастильне композиційне покриття. Такий метод сприяє зростанню мікротвердості у 1,5–2 рази, зменшенню інтенсивності зношування на 33–53% та підвищенню контактної витривалості приблизно на 54%.

Запропоновано також інноваційний спосіб підвищення довговічності пар тертя, що полягає у нанесенні на попередньо сформований мікрорельєф антифрикційного композиційного шару методом фрикційного переносу. Отримане покриття зберігає термостійкість до температури 870 К.

Дослідження зразків зі сталей 40, 20Х, 40Х, 12ХН3А, 38ХН3МА показали, що найбільш ефективним варіантом є комплексна схема: обкатка кулькою для незагартованого вала та розточування з подальшим ППД-розточуванням або формуванням регулярного мікрорельєфу для втулки. У роботах різних авторів узагальнено позитивні результати застосування кульової обкатки, ультразвукового зміцнення та обробки обертовими механічними щітками на загартованих і легованих сталях, а також титані.

Зокрема, при ППД щітками титанових сплавів (наприклад, сплав ПТЗВ із міцністю $\sigma_v = 650 \dots 900$ МПа) твердість поверхневого шару збільшується на 15–30% при глибині зміцнення 0,1–0,3 мм. Середнє арифметичне відхилення мікропрофілю знижується у 1,2–1,4 раза, а знос – на 30–40% порівняно зі шліфованими поверхнями. Також скорочується у 1,5–2,2 раза час прирабовування, що додатково підвищує зносостійкість.

Досягнення високої довговічності елементів машин можливе завдяки формуванню оптимальних полів залишкових напружень у поверхневих шарах деталей. Одним із таких підходів є термопластичне зміцнення, яке реалізується у два етапи: спочатку визначається розподіл температур у матеріалі, після чого розраховуються величини залишкових напружень та пластичних деформацій.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68

3.2. Створення вдосконаленої конструкції пристрою для виконання поверхнево-пластичного деформування

Зазвичай процес накатування, або поверхнево-пластичного деформування, виконують роликком чи кулькою за кілька послідовних проходів. Як інженерне удосконалення пропонується застосувати модернізовану конструкцію накатної головки (рис. 3.3).

Запропонована головка містить кульку, закріплену у змінному корпусі та навантажену пружиною заданої жорсткості. Параметри пружини добираються на основі розрахунку необхідної глибини деформації та механічних властивостей матеріалу деталі. Накатна кулька має твердість 60...63 HRC і виготовляється зі швидкорізальної сталі Р6М5. Вона виконує роль першого ступеня впливу – основного деформуючого елемента.

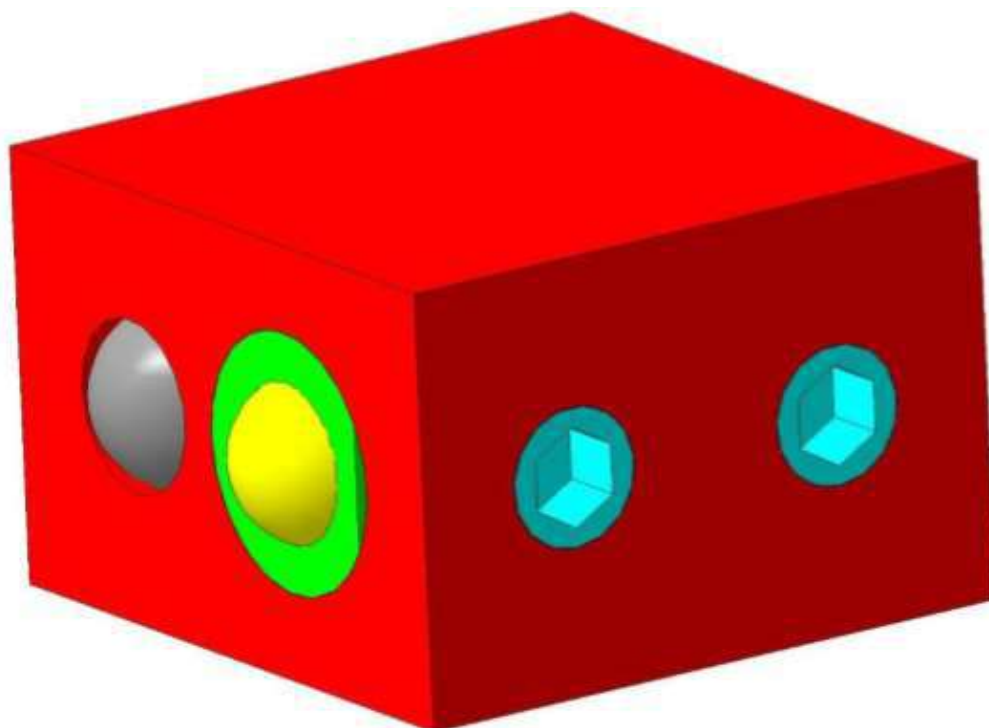


Рисунок 3.3 – Конструкція накатної головки.

У центральній частині корпусу встановлено другий, твёрдосплавний елемент зі сферичним торцем. Його призначення полягає у вирівнюванні та «виходжуванні» поверхні після первинного деформування. Завдяки цьому

технологічне завдання, яке зазвичай потребує двох проходів (накатування та додаткове дороблення), можна виконати за один. Це забезпечує нижчу шорсткість поверхні, підвищує однорідність мікрорельєфу та покращує експлуатаційну надійність деталі.

Матеріалом твердосплавного елемента є сплав ВК8, а шорсткість його сферичної робочої поверхні становить Ra 0,1 мкм.

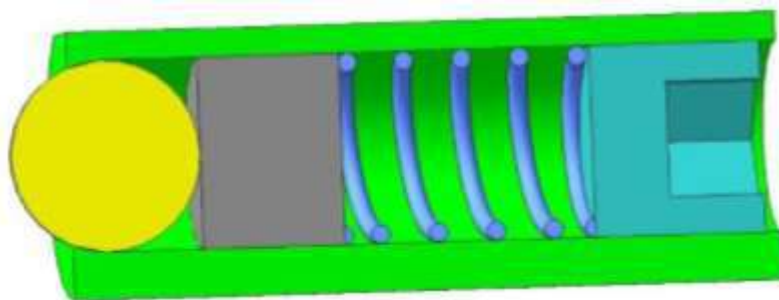


Рисунок 3.4 – Перша ступень накатника.

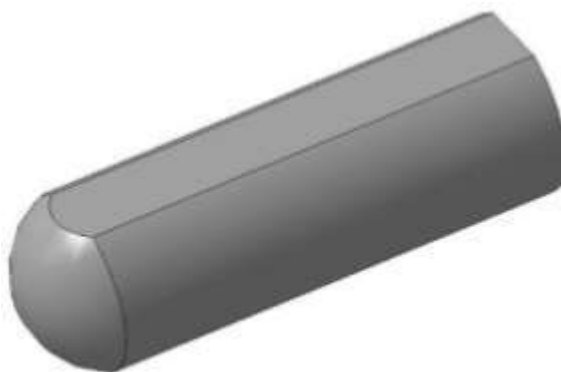


Рисунок 3.5 – Твердосплавний елемент.

Отже, для запропонованої конструкції інструмента необхідно провести аналіз напружено-деформованого стану (НДС) з метою встановлення, чи не перевищують отримані напруження допустимі значення. Дослідження НДС пристрою включає оцінку його міцності, виявлення зон концентрації напружень та елементів, у яких напруження перевищують граничні для обраного матеріалу. У разі виявлення таких ділянок конструкцію слід доопрацювати.

Як принцип закріплення прийнято фіксацію за зовнішню поверхню призматичного корпусу. Для отримання розподілу переміщень і напружень у

вузлах інструмента та в місцях їх взаємодії виконано числове моделювання в ANSYS [25, 26]. Розрахункові схеми навантаження, побудована скінченно-елементна сітка, а також поля переміщень і напружень під час роботи інструмента наведені на рис. 3.4–3.8.

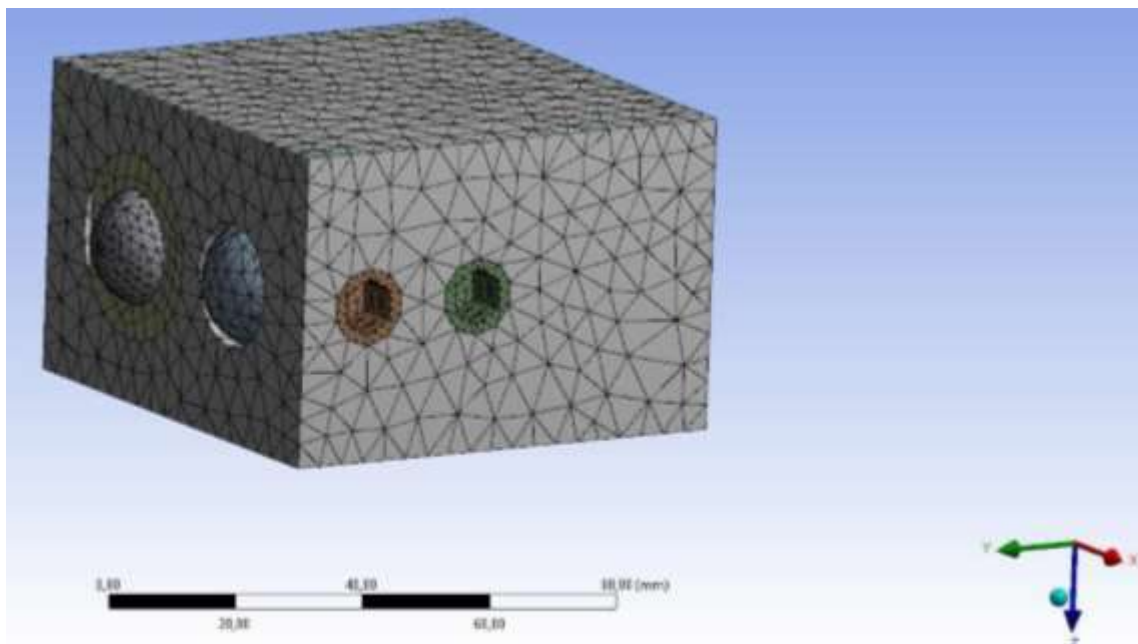


Рисунок 3.6 – Скінчено елементна сітка накатної головки.

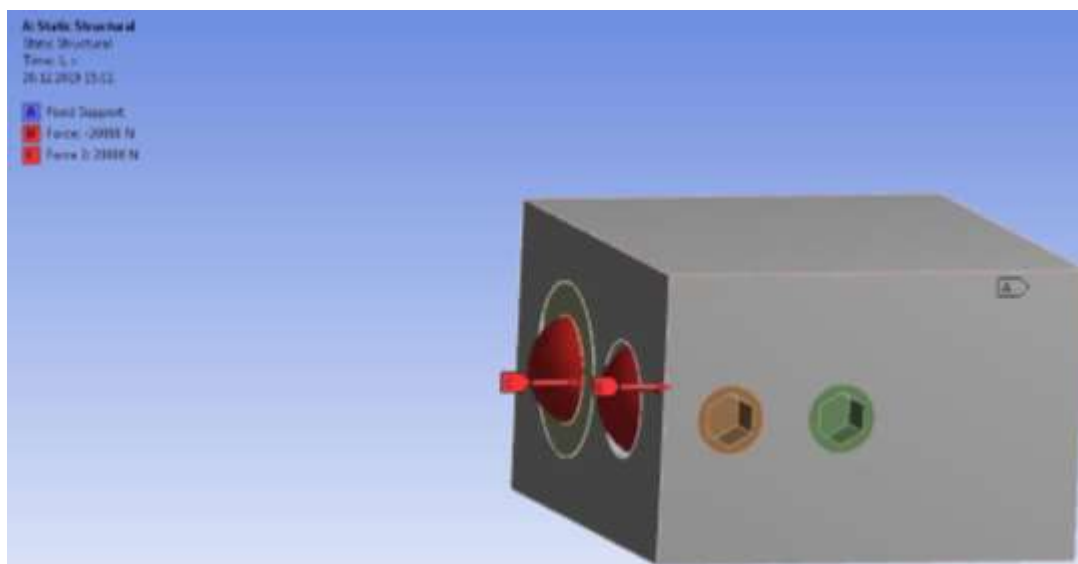


Рисунок 3.7 – Схема навантажень.

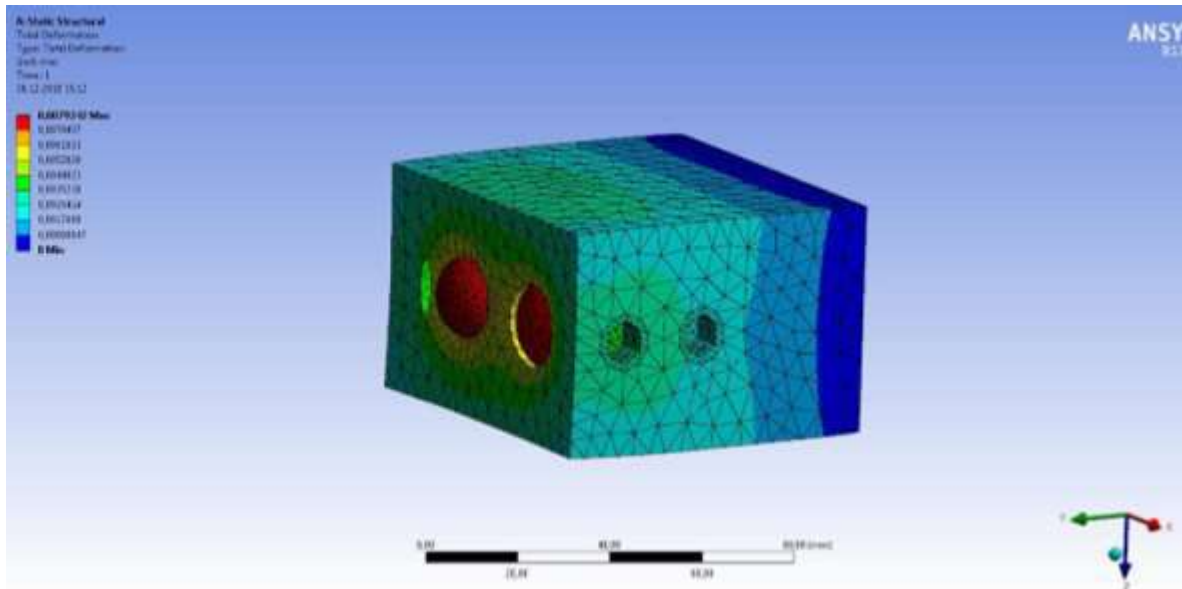


Рисунок 3.8 – Загальні переміщення елементів.

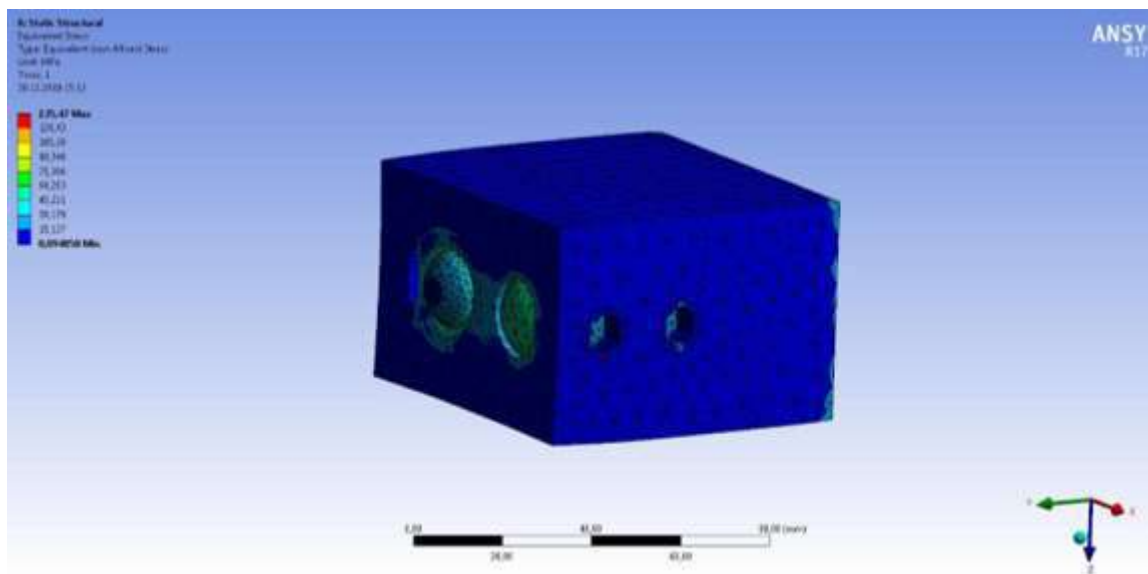
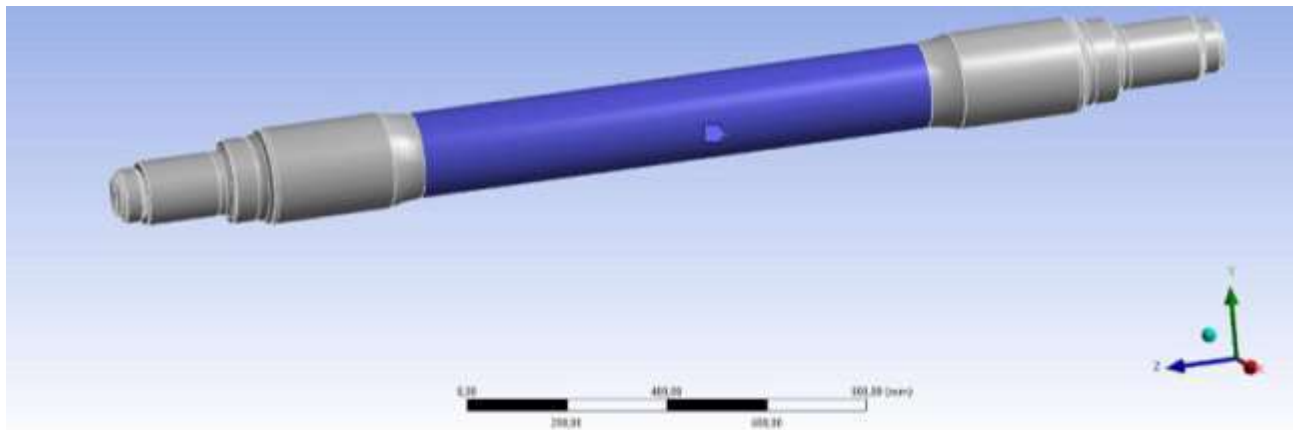


Рисунок 3.9 – Напруження елементів накатної оправки.

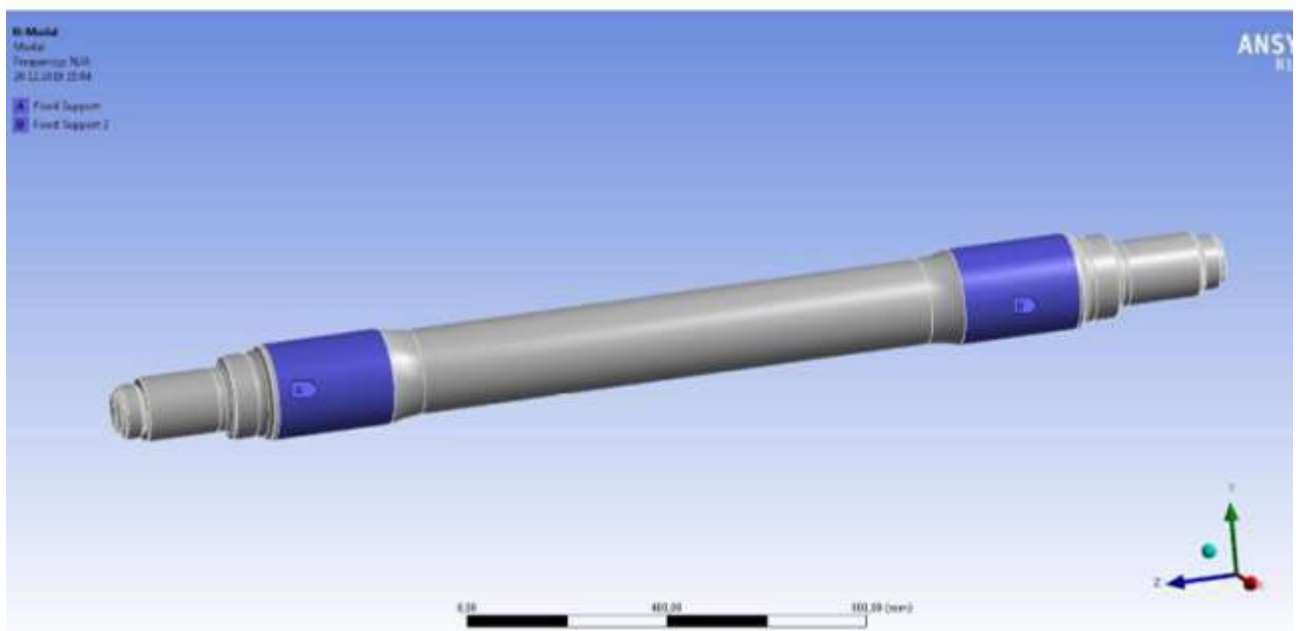
Отже, отримані результати свідчать, що максимальні переміщення елементів оправки не перевищують 0,015 мм, а рівень напружень залишається нижчим за 135 МПа, що повністю відповідає допустимим значенням для матеріалів складових накатної оправки. Таким чином, запропонована конструкція може ефективно застосовуватися для накочування поверхонь деталі типу «вісь» і забезпечує скорочення як основного, так і допоміжного часу орієнтовно удвічі завдяки можливості виконання обробки за один прохід.

3.3. Аналіз власних частот деталі

Оскільки деталь типу «вісь» характеризується значною довжиною відносно діаметра, її загальна жорсткість є недостатньою. Тому для уникнення резонансних явищ під час процесу накручування необхідно забезпечити неспівпадіння частот власних коливань деталі та частоти її обертання. Розв'язання цього завдання передбачає підбір оптимальної частоти обертання шпинделя верстата та заготовки.



З ОДНИМ ЛЮНЕТОМ



З ДВОМА ЛЮНЕТАМИ

Рисунок 3.10 – Схема закріплення з одним та двома люнетами.

					<i>KPMMTBA25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		73

З цією метою у середовищі ANSYS Workbench, використовуючи модуль Modal Analysis, було визначено власні частоти коливань вісі та виконано їх порівняння з робочими частотами при накручуванні.

Аналіз проводився для двох варіантів закріплення:

- із застосуванням одного люнета, розташованого в центральній частині;
- із використанням двох люнетів, установлених на підшипникових шийках.

Отримані частоти коливань наведені в табл. 3.1 та на рис. 3.12–3.14 для першої схеми, а також у табл. 3.2 та на рис. 3.15–3.17 для другої схеми. Відповідні варіанти закріплення представлені на рис. 3.10–3.11.

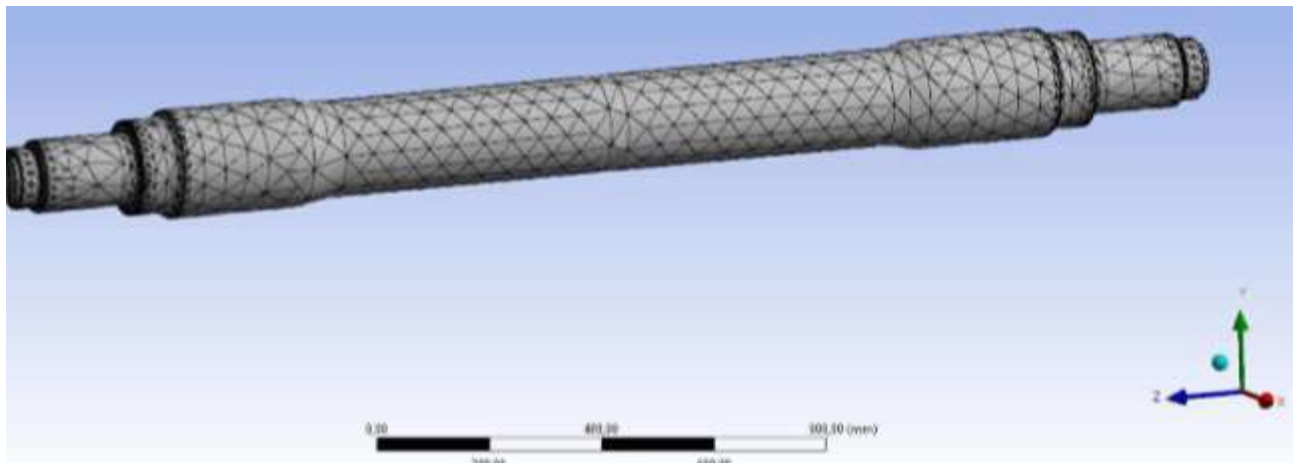


Рисунок 3.11 – Скінчено елементна сітка вісі.

Отримані результати модального аналізу дають можливість за потреби коригувати режими роботи, забезпечуючи уникнення резонансних частот.

Таблиця 3.1 – Порівняльна таблиця частот власних коливань (1-й варіант)

1-ша критична частота, Гц	2-га критична частота, Гц	3-я критична частота, Гц	Частота обертання деталі, при накручуванні, Гц
439	440	441	20

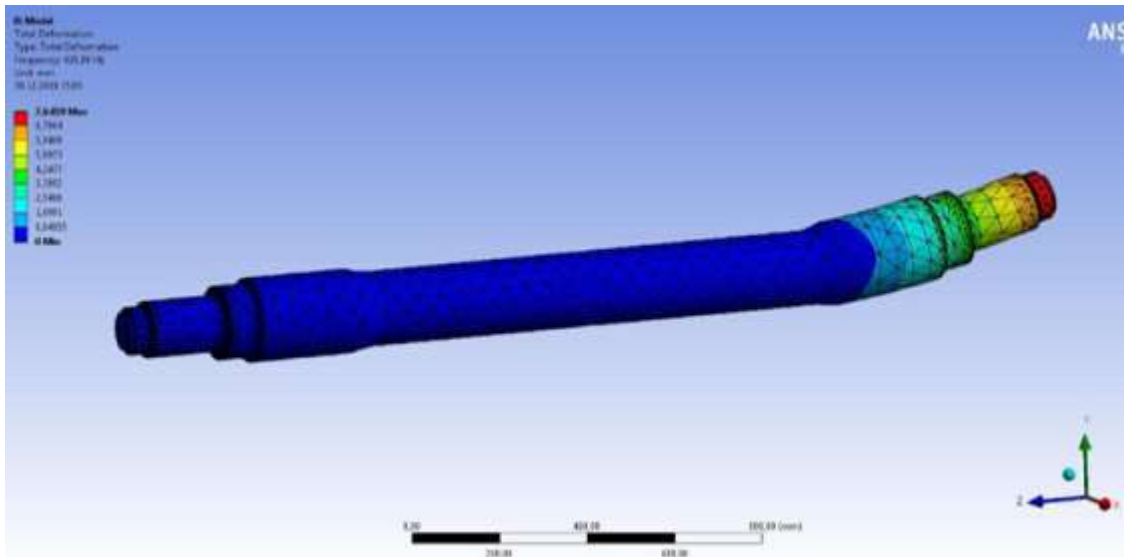


Рисунок 3.12 – Ілюстрація 1-шої частоти (1-й варіант закріплення).

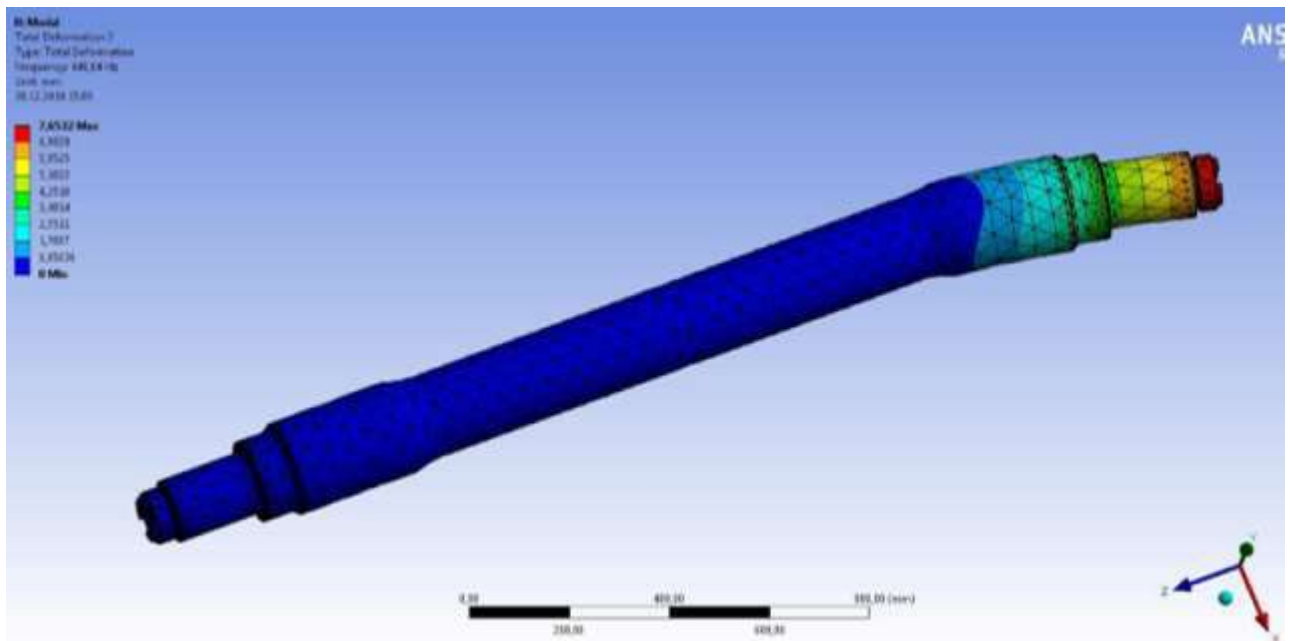


Рисунок 3.13 – Ілюстрація 2-гої частоти (1-й варіант закріплення).

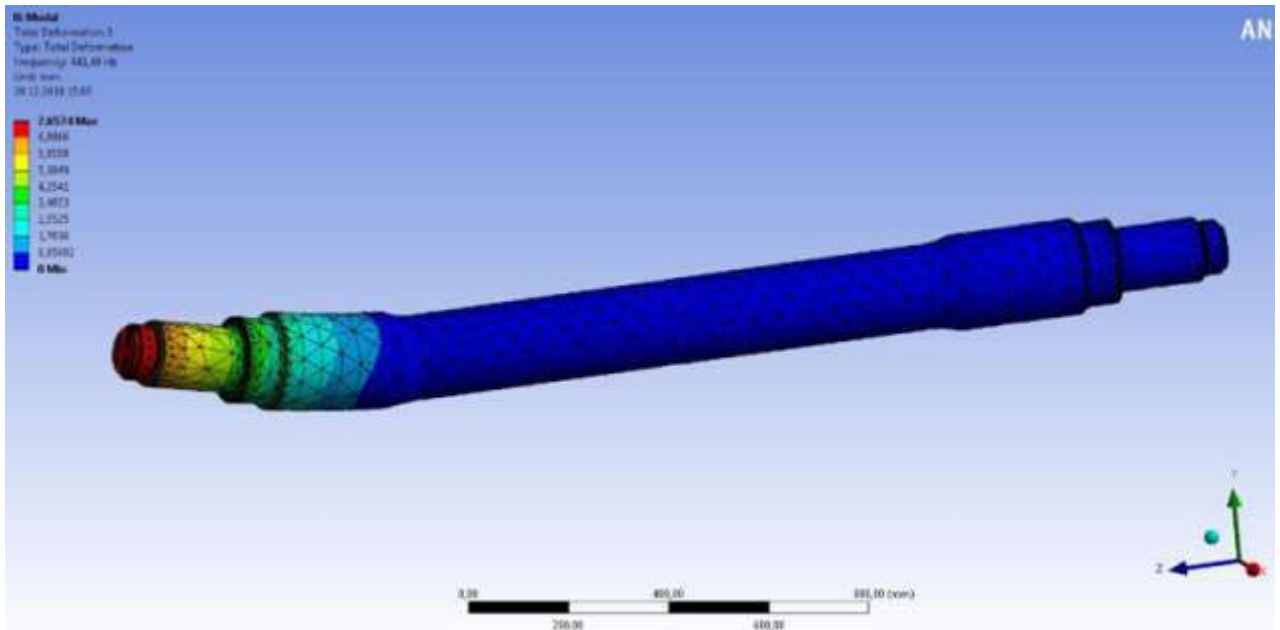


Рисунок 3.14 – Ілюстрація 3-ої частоти (1-й варіант закріплення).

Таблиця 3.2 – Порівняльна таблиця частот власних коливань (2-й варіант)

1-ша критична частота, Гц	2-га критична частота, Гц	3-я критична частота, Гц	Частота обертання деталі, при накатуванні, Гц
506	506	1253	20

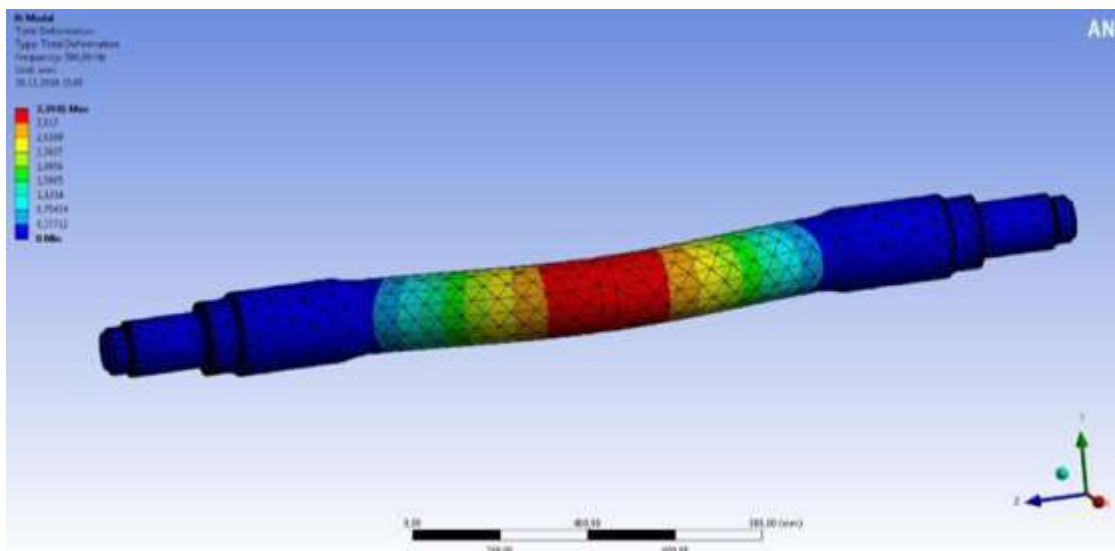


Рисунок 3.15 – Ілюстрація 1-шої частоти (2-й варіант закріплення).

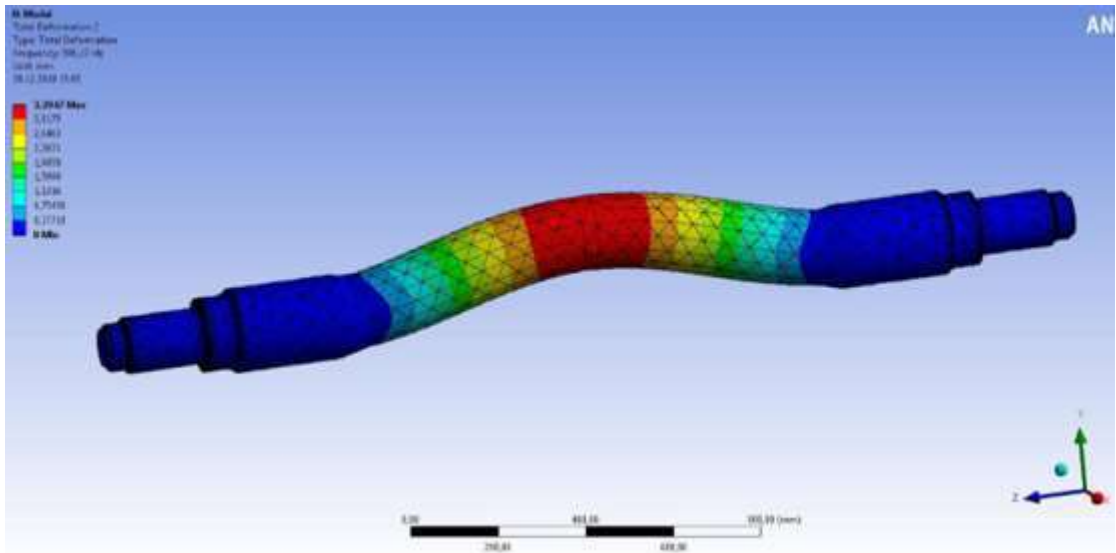


Рисунок 3.16 – Ілюстрація 2-гої частоти (2-й варіант закріплення).

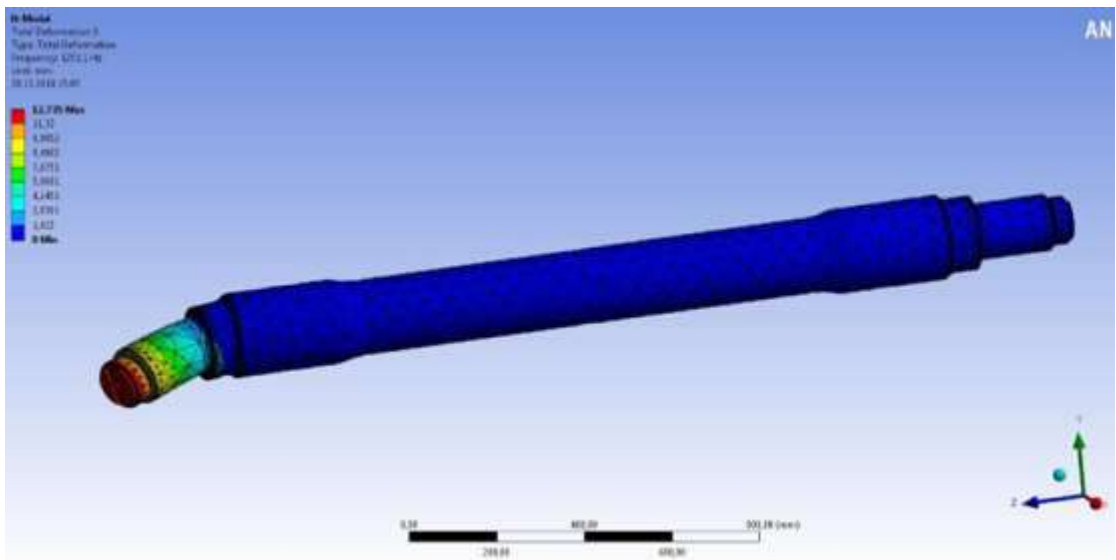


Рисунок 3.17 – Ілюстрація 3-ої частоти (2-й варіант закріплення).

Із табл. 3.1 та 3.2 видно, що для осі за обома варіантами закріплення резонансні явища не спостерігаються, оскільки перші власні частоти – 439 Гц та 506 Гц – значно перевищують максимальну робочу частоту процесу накатування (20 Гц). Це підтверджує достатню жорсткість системи та можливість виконання обробки без переходу у резонансний режим.

3.4 Висновки за розділом

Розроблено удосконалену конструкцію накатної головки, що забезпечує можливість виконання ППД за один прохід замість двох, що, у свою чергу,

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		77

суттєво скорочує основний, допоміжний та штучний час, а також зменшує кількість переустановлень заготовки.

Визначено максимальні переміщення та рівні напружень у деталях конструкції накатної голівки; показано, що вони не перевищують допустимих значень, що гарантує її працездатність та безпечну експлуатацію без загрози руйнування.

Проведений модальний аналіз деталі «вісь» дозволив визначити її критичні власні частоти. Порівняння їх із частотами процесу накатування встановило, що за прийнятих режимів обробки резонансні коливання не виникатимуть.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		78

УЗАГАЛЬНЕНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження технологічного процесу виготовлення деталі «вісь» та розроблено науково обґрунтовані рішення, спрямовані на підвищення ефективності її механічної обробки й експлуатаційної надійності. У результаті аналізу чинного технологічного маршруту визначено основні недоліки та запропоновано новий, раціональніший варіант процесу, що передбачає застосування сучасного металорізального обладнання з ЧПК, оптимізованих схем базування та спеціально спроектованого пневмоприводного пристрою для горизонтально-розточувальної операції.

Аналітичними розрахунками визначено припуски, режими обробки, необхідне оснащення та проведено технічне нормування операцій, що дозволило сформувати повний комплект технологічної документації. Розроблена накатна головка для поверхнево-пластичного деформування забезпечує виконання ППД за один прохід, суттєво зменшує основний і допоміжний час, підвищує стабільність якості та знижує кількість переустановлень.

За результатами моделювання напружено-деформованого стану встановлено, що максимальні переміщення та напруження в елементах конструкції не перевищують допустимих значень, що гарантує працездатність та надійність пристрою. Модальний аналіз деталі «вісь» засвідчив відсутність ризику виникнення резонансних режимів у процесі накатування, а отже – достатню жорсткість системи.

У сукупності виконані дослідження підтверджують наукову й практичну ефективність запропонованих рішень, що забезпечують підвищення технологічності, точності, продуктивності та експлуатаційної надійності деталі.

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савуляк В.Й., Савуляк В.В. Зносостійкі покриття з градієнтними властивостями // Вісник машинобудування та транспорту. – 2019. – №2. – С. 54–62.
2. Гапонова О.В., Авраменко А.А. Особливості формування зміцнених шарів при іонно-плазмовому легуванні титану // Journal of Mechanical Engineering NTU KhPI. – 2020. – №3. – С. 21–30.
3. Mishchenko A., Koniakhin V. Modern surface hardening techniques for steels // Materials Science Forum. – 2018. – Vol. 941. – P. 15–23.
4. Kumar S., Singh H. Advances in roller burnishing processes: a review // Surface Engineering. – 2021. – Vol. 37(7). – P. 867–880.
5. Krolczyk G., Legutko S. Finishing machining processes and tribological properties // Advances in Manufacturing Science and Technology. – 2017. – Vol. 41(3). – P. 5–17.
6. Faga M.G., Gautier G. Surface integrity after ball-burnishing and polishing // Wear. – 2016. – Vol. 368–369. – P. 287–295.
7. Amini S., Soleimani M. Effect of mechanical surface treatment on fatigue behavior of metals // International Journal of Fatigue. – 2020. – Vol. 131. – 105342. – 12 p.
8. Sahin Y. On the influence of surface plastic deformation on fatigue strength // Materials & Design. – 2015. – Vol. 66. – P. 597–605.
9. Wang Z., Liu Y. Modal and harmonic analysis of slender shafts by FEA // Journal of Mechanical Design. – 2021. – Vol. 143(4). – P. 1–12.
10. Sun Y. Thermochemical surface engineering of steels // Surface Engineering. – 2019. – Vol. 35(4). – P. 263–275.
11. Laubscher R. Advanced machining processes in modern engineering // Journal of Manufacturing Processes. – 2022. – Vol. 78. – P. 531–545.
12. Antonio C., Correia J. Finite Element Simulation of cold working processes // Engineering Failure Analysis. – 2017. – Vol. 74. – P. 78–90.

					КРММТВА25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		80

13. Artymowicz R., Pietraszek J. Burnishing parameters influence on surface roughness // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 254. – 5 p.
14. Torrisi L., Gammino S. Surface modification of titanium alloys // Applied Surface Science. – 2020. – Vol. 510. – 145357. – 8 p.
15. Bhushan B. Modern Tribology Handbook. – 3rd ed. – Boca Raton: CRC Press, 2018. – 1872 p.
16. Aghaei A., Akbari J. Residual stresses after ball burnishing // Journal of Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 29. – P. 1–10.
17. Yarema S., Velychko O. Accuracy and stiffness analysis in machining of long shafts // Mechanics and Advanced Technologies. – 2022. – №3. – C. 45–55.
18. Grzesik W. Advanced machining of metallic materials. – 2nd ed. – Elsevier, 2016. – 584 p.
19. Morozov M., Kljuno E. Experimental evaluation of tool stiffness in CNC turning // Precision Engineering. – 2023. – Vol. 82. – P. 334–344.
20. Caggiano A. Industry 4.0 applications in CNC machining // Procedia CIRP. – 2019. – Vol. 79. – P. 258–263.
21. Denys R., Ovsienko V. CNC machining of shafts: stability and accuracy // Engineering Mechanics. – 2021. – Vol. 28(2). – P. 73–84.
22. Gryniewicz A., Grzesik W. Tool materials for precision machining // Archives of Civil and Mechanical Engineering. – 2016. – Vol. 16(4). – P. 664–673.
23. Bielawski R., Bzowski K. Effect of diamond burnishing on surface integrity // Materials. – 2021. – Vol. 14. – 1378. – 15 p.
24. Kudzia S., Pawlus P. Hybrid surface finishing and its influence on functional surface properties // Tribology International. – 2020. – Vol. 145. – 106145. – 11 p.
25. Kumar P., Rani S. Surface integrity during burnishing of hardened steels // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 22. – P. 503–508.

					KPMMTBA25.24356.000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		81

ДОДАТКИ

					<i>КРММТВА25.24356.000 ПЗ</i>	Арк.
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		82