

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет інженерії машин, споруд та технологій
(назва факультету)

Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: **Конструювання фрезерної головки спеціального
фрезерно-центрувального верстата для торцювання циліндричних
заготованок**

Виконав (ла): студент (ка) IV курсу, групи МВ-41
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
(шифр і назва спеціальності)

	_____	Бублик В.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник	_____	Гагалюк А.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль	_____	Кобельник В.Р.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри	_____	Крупа В.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент	_____	_____
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет інженерії машин, споруд та технологій (ФМТ)
(повна назва факультету)
Кафедра конструювання верстатів, інструментів та машин
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Крупа В.В.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

на здобуття освітнього ступеня бакалавра
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування
(шифр і назва спеціальності)
студенту Бублику Віталію Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Конструювання фрезерної головки спеціального фрезерно-центрувального верстата для торцювання циліндричних заготовок

Керівник роботи Гагалюк Андрій Валерійович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від « 21 » 01 20_26 року № 4/9-45

2. Термін подання студентом завершеної роботи 22 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: креслення деталі та річна програма випуску, паспорт верстата

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ, 1. Аналітичний розділ: аналіз завдання, призначення деталі, характеристика матеріалу деталі та заготовки, визначення типу та організаційної форми виробництва характеристика типу виробництва.

2. Технологічний розділ: аналіз методу отримання заготовки, вибір базування, проектування маршруту оброблення, підбір верстатного обладнання та інструментального забезпечення, аналітичний розрахунок припусків і режимів різання для однієї технологічної операції (для решти ТО табличним методом)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів):
Креслення деталі та заготовки – 1фА1; технологічний аналіз обробки деталі – 1фА1;
Кінематична та структурно-кінематична схеми спеціального фрезерно-центрувального верстата – 1фА1, креслення фрезерної головки верстата – 1фА0

АНОТАЦІЯ

Бублик В.В. В. «Конструювання фрезерної головки спеціального фрезерно-центрувального верстата для торцювання циліндричних заготованок» : робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавр : спец. 133 – галузеве машинобудування / кер. А. В. Гагалюк. Тернопіль : факультет інженерії машин, споруд та технологій, кафедра конструювання верстатів інструментів та машин, група МВ-41.: ТНТУ, 2026.

У ході виконання роботи проведено комплексний силово-технологічний аналіз умов фрезерування заготовок у діапазоні діаметрів від 20 до 125 мм для чотирьох структурних груп матеріалів: нелегованої Сталі 45 (197 НВ), легованої Сталі 40ХН (210–240 НВ), сірого чавуну EN-GJL (180–210 НВ) та високоміцної азотованої сталі 34CrAlMo5-10. На основі режимів різання прогресивних насадних фрез TaeguTec Ø90...160 мм (зі сплавами TT7515, TT8625, TT9080) обґрунтовано пікові експлуатаційні навантаження (сила різання $P_z = 4754,4$ Н, крутний момент шпинделя $M_{кр} = 296,7$ Н).

Виконано геометричний та кінематичний синтез 3-ступеневої коробки швидкостей зі знаменником ряду $\phi=1,41$ (ряд R10). Спроектовано уніфіковану 9-швидкісну гітару змінних коліс, перекриваючи діапазон частот шпинделя від 78,7 до 1114,0 об/хв. Розраховано параметри вхідного конічного ступеня та вихідної циліндричної пари.

Запропоновано дві альтернативні концепції модернізації приводу: модульну енергоефективну на базі двигуна АИР112М4 (5,5 кВт) із розробленням перехідного фланця-адаптера та ступінчастого перехідного вала з внутрішньою та зовнішньою циліндричними поверхнями з'єднання Ø28/Ø32 мм; а також максимальну силову на базі двигуна АИР132М4 (11 кВт) прямого монтажу без додаткових фланців, здатну короткочасно реалізувати момент до 1144,7 Н·м на шпинделі у повторно-короткочасному режимі S1.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	АНОТАЦІЯ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Бублик В.В.</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					4	1
<i>Рецензент</i>						<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

Проведено аналіз динамічної стійкості системи на частоті 125 Гц та доведено ефективність гасіння вібрацій за рахунок асиметричного кроку зубів фрез $z = 10 \dots 12$ та жорсткості станини масою 6,5 т.

В розділі з безпеки життєдіяльності та основ охорони праці висвітлюються питання техніки безпеки при роботі на фрезерно-центрувальному автоматі та вплив на екологію.

Ключові слова: ЗАГОТОВКА, ФРЕЗЕРНА ГОЛОВКА, ТОРЦЕВА ФРЕЗА, АВТОМАТ, ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ПРОЦЕС, ЦЕНТРУВАННЯ, ФРЕЗЕРУВАННЯ.

Annotation

Bublyk V. V. “Design of a milling head of a special milling-centering machine for facing cylindrical workpieces”: work for the qualification degree of bachelor: spec. 133 – branch mechanical engineering / ed. A. V. Gagalyuk. Ternopil: Faculty of Mechanical Engineering, Structures and Technologies, Department of Design of Machine Tools and Machines, Group MV-41.: TNTU, 2026.

During the work, a comprehensive power and technological analysis of the conditions for milling workpieces in the diameter range from 20 to 125 mm was carried out for four structural groups of materials: unalloyed Steel 45 (197 HB), alloyed Steel 40KHn (210–240 HB), gray cast iron EN-GJL (180–210 HB) and high-strength nitrided steel 34CrAlMo5-10. Based on the cutting modes of progressive TaeguTec $\varnothing 90 \dots 160$ mm end mills (with TT7515, TT8625, TT9080 alloys), peak operating loads (cutting force $P_z = 4754.4 \text{ N}$, spindle torque $M_{kp} = 296.7 \text{ N}$) were justified.

A geometric and kinematic synthesis of a 3-speed gearbox with a series denominator of $\varphi = 1.41$ (series R10) was performed. A unified 9-speed guitar of interchangeable wheels was designed, covering the spindle frequency range from 78.7 to 1114.0 rpm. The parameters of the input conical stage and the output cylindrical pair were calculated.

Two alternative concepts of drive modernization were proposed: a modular energy-efficient one based on the AIR112M4 engine (5.5 kW) with the development of an adapter flange and a stepped transition shaft with internal and external cylindrical surfaces of the

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						5
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

connection Ø28/Ø32 mm; as well as the maximum power based on the AIR132M4 engine (11 kW) of direct mounting without additional flanges, capable of briefly realizing a torque of up to 1144.7 N m on the spindle in the repeated short-term mode S1.

An analysis of the dynamic stability of the system at a frequency of 125 Hz was carried out and the effectiveness of vibration damping was proven due to the asymmetric pitch of the milling cutter teeth $z=10\dots12$ and the rigidity of the bed weighing 6.5 tons.

The section on life safety and the basics of labor protection raises safety issues when working on a milling and centering machine and the impact on the environment.

Keywords: BLANK, MILLING HEAD, END MILL, AUTOMATIC, TECHNOLOGICAL PROCESS, CENTERING, MILLING.

.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						6
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	12
1.1 Передумови для проведення модернізації та її актуальність	12
1.2 Огляд типових деталей	13
1.3 Літературний огляд	15
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	19
2.1 Аналіз твердих сплавів і вибір інструменту	19
2.2 Аналіз та обґрунтування методу отримання заготовки	21
2.3 Розрахунок режимів різання	21
2.4 Техніко-технологічне обґрунтування результатів розрахунку режимів різання.....	25
3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	28
3.1 Вихідні дані для проєктування та силового розрахунку приводу	28
3.2 Опис конструкції та принципу роботи фрезерувальної головки.	29
3.3 Опис компонувальних та конструктивно-експлуатаційних можливостей верстату	29
3.4 Кінематичний розрахунок фрезерної головки.....	30
3.5 Геометричний розрахунок зубчастих коліс	33
3.5.1 Геометричний розрахунок конічної пари	33
3.5.2 Геометричний розрахунок коліс гітари (2-й ступінь, $m = 2,0$).....	36
3.5.3 Геометричний розрахунок вихідної пари (3-й ступінь)	36
3.6 Розрахунок динамічних параметрів процесу торцювання.....	38
3.7 Перевірочний розрахунок зубів на міцність	38
3.7.1 Розрахунок зубів на контактну міцність	38
3.7.2 Розрахунок зубів на контактну втому (запобігання викривуванню)	39
3.7.3 Розрахунок зубів на втому від згину (запобігання зламу)	40

<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>				
Змн.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.		Бублик В.В.		
Перевір.		Гагальюк А.В.		
Рецензент				
Н. контр.		Кобельник В.Р.		
Затверд.		Крупа В.В.		
ЗМІСТ			Літ.	Арк.
			7	2
<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>				

4	БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ.....	42
4.1	Інструкція з техніки безпеки при роботі на фрезерно-центрувальному автоматі.....	42
4.2	Охорона навколишнього середовища при роботі на фрезерно-центрувальному обладнанні	44
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	47
	ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	49
	ДОДАТКИ	

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						8
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ВСТУП

Актуальність теми. Стратегічний розвиток промислового потенціалу держави безпосередньо залежать від стану її машинобудівного комплексу. Саме машинобудування формує технологічний фундамент для модернізації і розвитку виробничих потужностей усіх секторів економіки. В умовах сучасних економічних викликів перед підприємствами гостро постає дилема: закупівля дорогого імпортного обладнання чи модернізація наявного верстатного парку. Попри солідний експлуатаційний вік, другий шлях є економічно вигіднішим, оскільки дозволяє з мінімальними витратами повернути техніці конкурентоспроможні експлуатаційні характеристики.

На багатьох українських заводах основу серійного виготовлення ступінчастих валів досі складають багатопозиційні напівавтомати попередніх поколінь, зокрема фрезерно-центрувальні автомати (ФЦА) однопозиційні та барабанні трипозиційні. Головними перевагами цих верстатів є поєднання технологічних операцій фрезерування торців і свердління центрів. Приводні частини таких верстатів за десятиліття експлуатації зазнали суттєвого морального та фізичного зносу. Використання застарілих двигунів з низьким ККД, класичних систем керування та інструментальних головок старого зразка призводить до значних енергетичних втрат, обмежує точність обробки та не дозволяє впроваджувати сучасний швидкісний інструмент. Попри використання їх у серійному і масовому виробництві, ми вбачаємо їх використання й у середньо і дрібносерійному. Переважна кількість підприємств машинобудування працюють з невеликими партіями деталей, для яких, використання круглого прокату у якості заготовок є найбільш раціональним вибором. Модернізація старих фрезерно-центрувальних автоматів дозволить скоротити основний час на такі операції як торцювання і центрування заготовок, навіть коли їх обробляють на сучасних верстатах з ЧПК.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Бублик В.В.</i>					9	6
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>				<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Рецензент</i>								
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

У зв'язку з цим, комплексний інженерний перерахунок механічних вузлів і впровадження енергоефективних приводів нового покоління та адаптація шпиндельного вузла під прогресивні торцеві фрези зі змінними твердосплавними пластинами є вкрай актуальним науково-практичним завданням. Така модернізація дозволить інтегрувати важкі фрезерно-центрувальні напівавтомати у сучасні автоматизовані гнучкі системи та мінімізує собівартість металообробки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Ця робота є частиною тематики кваліфікаційних студентських робіт кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин за напрямом удосконалення, відновлення та модернізації металорізального обладнання промислових підприємств.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення техніко-економічної ефективності та точності роботи фрезерно-центрувального напівавтомата барабанного типу шляхом модернізації його виконавчого механізму торцевого фрезерування.

Для реалізації цієї мети поставлено такі завдання:

1. Оцінити поточний технічний стан фрезерно-центрувального обладнання аналізованого класу та обґрунтувати доцільність інженерного відновлення його виконавчих органів.
2. Виконати силовий і кінематичний розрахунки приводу головного руху фрезерної головки верстата за сучасними режимами різання для оновлення виконавчого механізму.
3. Розробити параметричну 3D-модель оновленого редуктора та митрової конічної передачі виконавчого вузла у середовищі тривимірного моделювання.
4. Проектувати конструкцію адаптивного фланцевого з'єднання під сучасний енергоефективний двигун загальнопромислового типу для забезпечення надійної роботи модернізованого механізму фрезерування.
5. Проаналізувати техніко-економічні показники проекту модернізації та оцінити терміни окупності впроваджених рішень.

Об'єкт дослідження – автоматизований цикл суміщеної торцево-фрезерної та центрувальної обробки валів на багатопозиційному металорізальному обладнанні.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						10
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Предмет дослідження – конструктивні, геометричні та силові параметри механізмів фрезерної головки напівавтомата.

Методи дослідження. Теоретичну базу роботи становлять методи проектування металорізальних верстатів, теорія різання металів, а також сучасні інструменти САПР для розробки тривимірних моделей та оформлення конструкторської документації.

Наукова новизна одержаних результатів. Полягає у вдосконаленні інженерного підходу до модернізації важких багатопозиційних напівавтоматів шляхом розрахункового обґрунтування геометрії перехідних адаптерів приводів, що дозволяє зберегти динамічну жорсткість шпиндельного вузла при оптимізації габаритів електродвигунів виконавчого механізму.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені графічні матеріали, геометричні розрахунки редуктора та конструкторська документація перехідного вузла фрезерної бабки мають високу ступінь готовності та можуть безпосередньо впроваджуватися на машинобудівних підприємствах під час проведення капітальних ремонтів та модернізацій верстатного парку.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						<i>11</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ

1.1 Передумови для проведення модернізації та її актуальність

Метою кваліфікаційної роботи бакалавра є конструювання фрезерної головки фрезерно-центрувального автомата для торцювання циліндричних заготовок.

Вихідними даними на кваліфікаційну роботу бакалавра є паспорт верстата-аналога, креслення типових деталей валів, технічні умови на їх виготовлення.

Верстат був інтегрований у великосерійне та масове машинобудівне виробництво і призначений для одночасного двобічного фрезерування торців та виконання центрових отворів у заготовках класу «тіла обертання» (валів, осей). Матеріал заготовок – Сталь 45 (нормалізована, твердість HB 170–210) і Сталь 40ХН (твердість HB 212 МПа), Сталь 41CrAlMo7-4 тощо.

Актуальність технічного переоснащення головного приводу фрезерних головок верстата зумовлена такими чинниками:

- 1) провадження прогресивного інструменту, який передбачає використання високоефективних насадних торцевих фрез діаметрами $D_{фр}=90\dots160$ мм, що закладено заводом, але із багатограними твердосплавними пластинами фірми TaeguTec (марки сплавів TT7515, TT8625, TT9080). Ці інструментальні матеріали нового покоління дозволяють значно підняти швидкість різання та швидкість зняття припуску, проте вимагають стабільного високого крутного моменту та гарантованої потужності приводу;
- 2) невідповідність потенціалу штатного приводу, у якому заводські асинхронні двигуни (серії АО2 або 4А потужністю 7,5 кВт або 10 кВт) є морально та фізично застарілими. Їхні енергетичні характеристики, низький сучасний ККД та високі пускові втрати обмежують інтенсифікацію режимів різання;

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	1 АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Бублик В.В.</i>					12	6
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>				<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Рецензент</i>								
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

- 3) наявна система ступенів швидкостей вимагає оптимізації під швидкісні режими фрез ТаeguТес для забезпечення мінімального машинного часу та виключення вібрацій, адже використання зазначених різальних матеріалів дозволяє виконувати процес різання на швидкостях від 35 м/хв до 390 м/хв.;

1.2 Огляд типових деталей

Вал шліцьовий – відноситься до ступінчастих деталей і має п'ять ступенів (рис.1.1). Поверхні 1 і 2 обробляють на фрезерно-центрувальному автоматі, які слугуватимуть подільшими чистовими базами. На пов. 8 монтуватимуть зубчасте колесо із посадкою із зазором. Поверхні 6 й 10 слугують для монтажу радіальних кульових підшипників, а пов. 7 та 9 є упорами для внутрішніх обойм підшипників. На різьбові поверхні 4 і 13 нагвинчують стопорні гайки, за допомогою яких регулюють натяг у підшипниках. Канавки 3 й 13 необхідні для стопоріння гайок. Поверхні 1 й 14 мають другорядне значення для службового призначення деталі. Матеріал вала – Сталь 45 ДСТУ 7809:2015 [2].

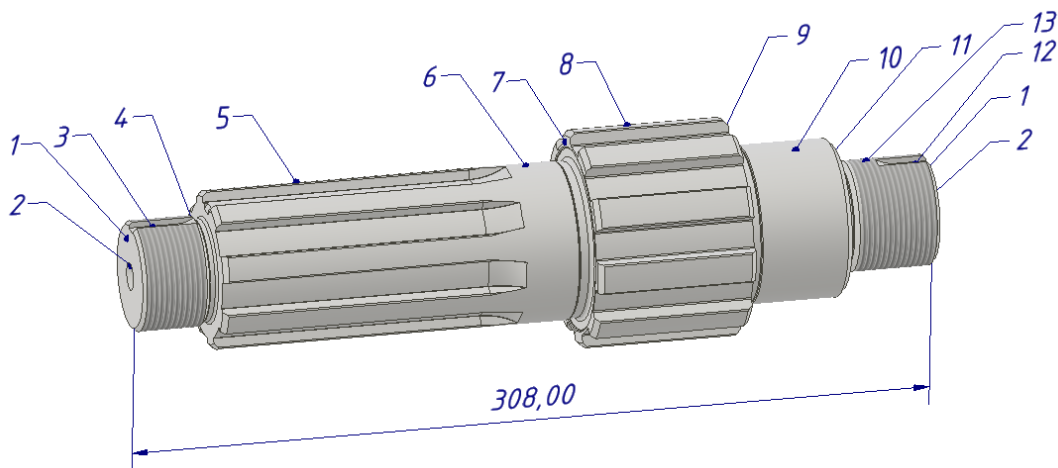


Рис. 1.1 – Вал шліцьовий

Таблиця 1.1 Хімічний склад сталі 45 у відповідності до ДСТУ 7809:2015 [2].

C	Si	Mn	P	Ni	Cr	S	Cu	As	Fe
0.42-0.5	0.17-0.37	0.5-0.8	<0.035	<0.25	<0.25	<0.04	<0.25	<0.08	~97

Таблиця 1.2 Механічні властивості сталі 45 після нормалізації

Стан поставки	Межа плинності, Rm(МПа)	Межа короткочасної міцності, ReH, МПа	Мінімальне відносне подовження σ , %	Відносне звуження, %
Після нормалізації	355	600	16	40

Інший вал (рис1.2) є частиною кутового редуктора приводу агрегата піднімального ремонту скважин АПРС-40, який встановлюють на шасі вантажівок.

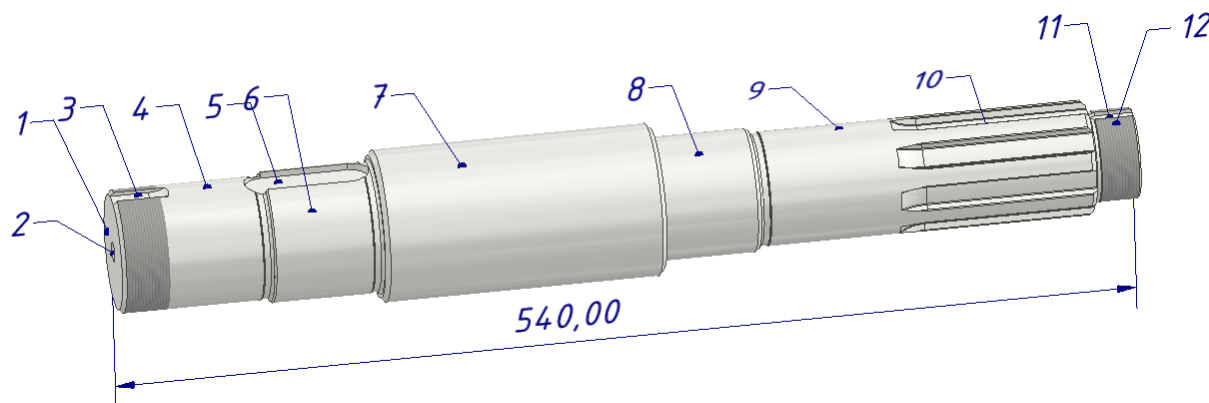


Рис. 1.2 – Вал лебідки

Таблиця 1.3 - Хімічний склад сталі 40X відповідно до ДСТУ 7806:2015 [3].

C	Si	Mn	NI	Cr	Cu	P	S
0.36-0.44	0.17-0.37	0.5-0.8	≤0.3	0.8-1.1	≤0.3	≤0.035	≤0.035

Таблиця 1.4 Механічні властивості сталі 40X

Термічна обробка	Межа плинності, Rm, МПа	Межа короткочасної міцності, ReH, МПа	Мінімальне відносне подовження, %	Відносне звуження, %
Загартування від 860°C в маслі, відпуск при 500°C	≥785	≥980	≥10	≥45

Торець 1 і центрувальний отвір 2 у цьому валові обробляються для формування чистових баз для подальшої обробки. Загальна довжина вала 540 мм, а максимальний діаметр 80 мм, що для заготовки складатиме біля 90 мм. Поверхні 3 і 12 призначенні для контргайок, якими регулюють натяг підшипників, які

базують на пов.4. і 9. На пов. 6 розташовують малу конічну шестерню. До пов.7 особливих вимог не ставиться, так як це не функціональна поверхня. Загалом обидва вали є типовими і їх попередньо обробляють на фрезерно-центрувальному автоматі для отримання чистових баз.

1.3 Літературний огляд

Підготовка торцевих поверхонь та центрових отворів циліндричних деталей (валів, осей, втулок) є вихідним етапом їхньої механічної обробки, адже саме ці елементи виконують функцію технологічних баз для всіх подальших переходів і визначають кінцеву точність деталі [11; 4]. Прагнення підприємств машинобудівної галузі до скорочення допоміжного часу та підвищення стабільності якості зумовило поширення фрезерно-центрувальних автоматів та агрегатних станків, на яких фрезерування обох торців і свердління центрових отворів виконується за один установ заготовки [47]. Саме тому доцільно проаналізувати наукові праці, у яких висвітлено конструктивні, точнісні та інструментальні питання, пов'язані з реалізацією подібних операцій.

Принципи компоновання шпиндельних вузлів багатошпиндельного устаткування, що за функціональним призначенням близьке до фрезерно-центрувальних автоматів, викладено у праці [47]: наведений формалізований опис шпиндельного вузла багатошпиндельного токарного автомата дозволяє аргументовано підходити до вибору його кінематичної схеми. Сучасні варіанти компоновання металорізального обладнання, у тому числі станків із паралельною кінематикою, узагальнено в посібнику, що дає матеріал для порівняння можливих схем виконання операцій торцювання та центрування. Конструктивні рішення багатоцільових станків для обробки корпусних деталей описано в роботі [57], яку можна використати як орієнтир під час обґрунтування компоновальної схеми проєктованого обладнання. Особливої уваги заслуговує праця [8] із топологічної оптимізації станини токарного верстата: запропоновані в ній підходи становлять методологічну основу для забезпечення необхідної жорсткості несучих деталей фрезерно-центрувальних автоматів, що прямо позначається на точності формування торців і центрових отворів.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						15
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Якість базування й закріплення заготовки в пристрої верстата визначальним чином впливає на точність торцювання та центрування. Найбільш дотичною до теми є праця [45], в якій обґрунтовано параметри спеціального трикулачкового патрона для затискання тонкостінних циліндричних заготовок з урахуванням їхньої пружної деформації під дією зусиль затиску – фактора, критичного для збереження положення осі деталі під час обробки. Похибки позиціонування деталей різної геометрії в механізмах кріплення та силової фіксації проаналізовано в роботі [52], методика якої придатна для оцінювання точності центрування циліндричних заготовок на фрезерно-центрувальних автоматах. Подібні підходи до підбору затискного оснащення, але для деталей призматичної форми, наведено в [57] – це дає змогу порівняти особливості закріплення тіл обертання й призматичних деталей. Практичну важливість точного центрування циліндричних поверхонь для забезпечення характеристик з'єднань ілюструє праця [13], присвячена виготовленню та застосуванню втулок коліс кочення ходової частини транспортних засобів.

Найближче до теми торцювання стоїть дослідження [53], де показано, як можна підвищити продуктивність та якість плоскої поверхні за рахунок комбінованого торцевого фрезерування; наведені залежності придатні для обґрунтування режимів обробки торців циліндричних заготовок на фрезерно-центрувальних автоматах. Моделі формування шорсткості циліндричних поверхонь під час точіння й розточування, описані в [37], дозволяють прогнозувати параметри шорсткості суміжних поверхонь, сформованих після операції центрування. Залежність висоти мікронерівностей від випадкових коливань подачі при точінні та розточуванні висвітлено в [24] – цей імовірнісний підхід можна застосувати й для оцінки якості поверхні після фрезерування торців. Окремо варто відзначити концепцію технологічної спадковості, розкрити в [18] стосовно точності форми поперечного перерізу циліндричних поверхонь гідروциліндрів: ця праця пояснює механізм перенесення похибок, закладених на операціях торцювання та центрування, на наступні етапи обробки циліндричних деталей.

Базові рекомендації щодо інструментальних матеріалів, режимів різання та

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						16
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

технічного нормування для типових операцій механічної обробки наведено в навчально-методичному посібнику [12], який може бути використаний для обґрунтування режимів торцювання та центрування. Конструкції багаторізцевих розточних головок з радіусними вершинами різців [35], із поділом припуску та подачі [43], а також інструментів з асиметричним [44] і попарно-асиметричним [54] розміщенням лез для обробки глибоких циліндричних отворів, хоча безпосередньо стосуються розточування, є корисним методичним матеріалом для проектування багатолезового інструменту фрезерно-центрувальних автоматів, призначеного для одночасної обробки кількох поверхонь заготовки. Інструментальні рішення для комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів описано в [38], а технологічні передумови підвищення якості такої обробки – в [39]; в обох працях розглянуто деформацію тонкостінних заготовок під дією сил різання, що актуально й для торцювання тонкостінних циліндричних деталей. Методи визначення тангенціальної складової сили різання залежно від подачі на базі теорії малих вибірок наведено в [9, 17, 19], а особливості розсіювання величин подач токарних верстатів в імовірнісному аспекті – в [28]. Оцінювання ефективності застосування твердосплавних пластинок у дрібносерійному виробництві на основі імовірнісно-статистичної моделі виконано в [25], що корисно під час вибору режучого інструменту для операцій торцювання та центрування.

За характером руху подач фрезерно-центрувальні автомати подібні до консольних фрезерних верстатів, тому показовою є праця [49], де запропоновано метод оцінювання статичної точності кінематичних ланцюгів подач консольних фрезерних верстатів; цей метод може бути адаптовано для оцінки точності переміщень виконавчих органів фрезерно-центрувальних автоматів. Метод ітерацій для дослідження точності подач металорізальних верстатів, наведений у [23], доповнює зазначений підхід кількісними оцінками похибок позиціонування. Серія праць [30, 31, 32, 33, 40, 41, 42], присвячених підвищенню точності та ефективності свердління наскрізних отворів на вертикально-свердлильних верстатах, безпосередньо пов'язана з операцією центрування (свердлінням центрових отворів): тут розглянуто жорсткість верстатів [31], кінематичну

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						17
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

точність механізму подач [32], а також регулювання подачі для зменшення задирок і підвищення стійкості інструменту [33, 40, 41, 42]. Ці результати дозволяють провести аналогічний аналіз похибок при свердлінні центрових отворів на фрезерно-центрувальних автоматах.

Для визначення припусків на механічну обробку, зокрема й на торцювання, доцільно скористатися табличним методом, описаним у посібнику [48]. Матеріал та геометричні параметри заготовки, що надходить на фрезерно-центрувальний автомат, регламентуються стандартом [2, 3] щодо сортового каліброваного прокату з вуглецевої якісної конструкційної сталі, який часто застосовується як вихідний матеріал для деталей типу «вал». Загальні підходи до моделювання параметрів технологічних маршрутів механічної обробки, представлені в [10] та [20], можуть бути застосовані при обґрунтуванні складу та послідовності операцій торцювання й центрування в межах загального технологічного процесу. Праці [55 – 60], пов’язані з прогнозуванням і підвищенням точності та експлуатаційних показників металорізальних верстатів, формують загальний контекст для обґрунтування вибору конкретної моделі фрезерно-центрувального автомата за критеріями точності й продуктивності.

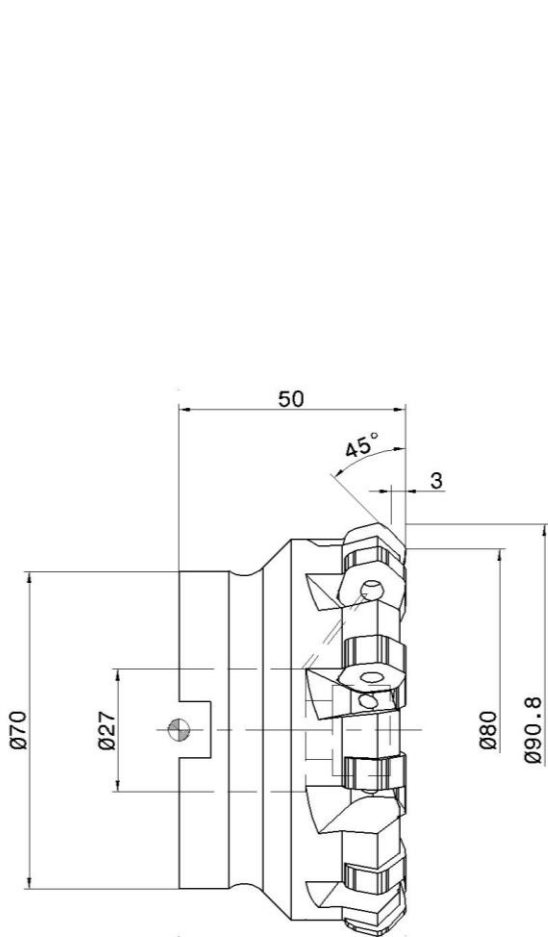
Висновок. Аналіз опрацьованих джерел показує, що окремі складові процесу обробки циліндричних заготовок висвітлено достатньо ґрунтовно: точність базування й закріплення тонкостінних деталей [45, 52], якість поверхні після торцевого фрезерування та точіння [53, 37, 24, 18], проєктування багатолезового розточувального та фрезерного інструменту [35, 38, 39, 43, 44, 54], а також точність кінематичних ланцюгів подач металорізальних верстатів [49, 23, 30 – 33; 40]. Проте комплексних робіт, у яких би одночасно враховувалися точність закріплення, режими різання та кінематична точність саме фрезерно-центрувальних автоматів стосовно поєднаних операцій торцювання й центрування циліндричних заготовок різних типорозмірів, у тому числі тонкостінних, у наявній літературі небагато. Це підтверджує доцільність подальшого дослідження, метою якого є узагальнення наведених методичних підходів та їх застосування до умов обробки конкретної деталі на фрезерно-центрувальному автоматі з метою підвищення точності й продуктивності зазначених операцій.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						18
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

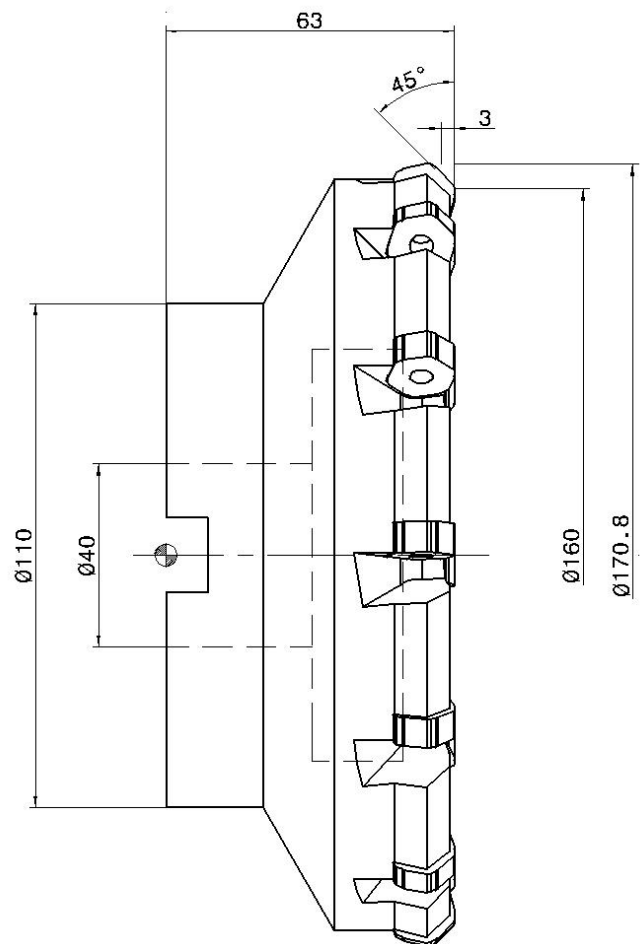
2.1 Аналіз твердих сплавів і вибір інструменту

Для фрезерування торців використаємо торцеві фрези 12D-TF45-1080-27R-06 Ø90 мм (рис.2.1) з 10 зубами і Taegutec 12D-TF45-R-06 і Ø160 мм (рис.2.2) із механічним кріпленням пластин із кутом різання 45°, які оснащуються двостронніми пластинами HXKU 1007 ANR-HR Economic з 12 ріжучими кромками для важкої чорнової обробки сталі та чавуну з максимальною глибиною різання $t=5,0$ мм.




 12D-TF45-1080-27R-06

Рис. 2.1 – Фреза Ø90 мм, z=10




 12D-TF45-12160-40R-06

Рис. 2.2 – Фреза Ø160 мм, z=12

<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>				
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>
		<i>Бублик В.В.</i>		
		<i>Гагальок А.В.</i>		
		<i>Кобельник В.Р.</i>		
		<i>Крупа В.В.</i>		
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ				
			<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>
			19	31
<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>				

Розміри цих фрез відповідають паспортним даним верстата. Вони є трьох типів твердих сплавів із рекомендованими швидкостями різання (рис.2.3):

- жовті TT9080 (покриття TiAlN-TiN методом PVD) універсальний дрібнозернистий сплав для нестабільних умов. Завдяки тонкому та гострому PVD-покриттю він створює найменші сили різання. Рекомендують використовувати на початкових етапах обробки, при фрезеруванні фрезами до Ø100 мм для груп оброблюваних матеріалів: P20 – P40, M20 – M40, S20 – S40 і $v_{різ} = 45 \dots 300$ м/хв.
- жовті TT7515 (покриття TiCN-Al₂O₃-TiN методом CVD). Це головний вибір для чистового та напівчистового фрезерування. Через товстий шар оксиду алюмінію (Al₂O₃) сплав має високу теплостійкість. Він добре працює на максимальних швидкостях різання $v_{різ} = 30 \dots 390$ м/хв. Добре підходить для сухого фрезерування (без ЗОР), оскільки висока температура у зоні різання лише активує захисні властивості покриття для груп оброблюваних матеріалів: K10 – K25 і H05 – H25

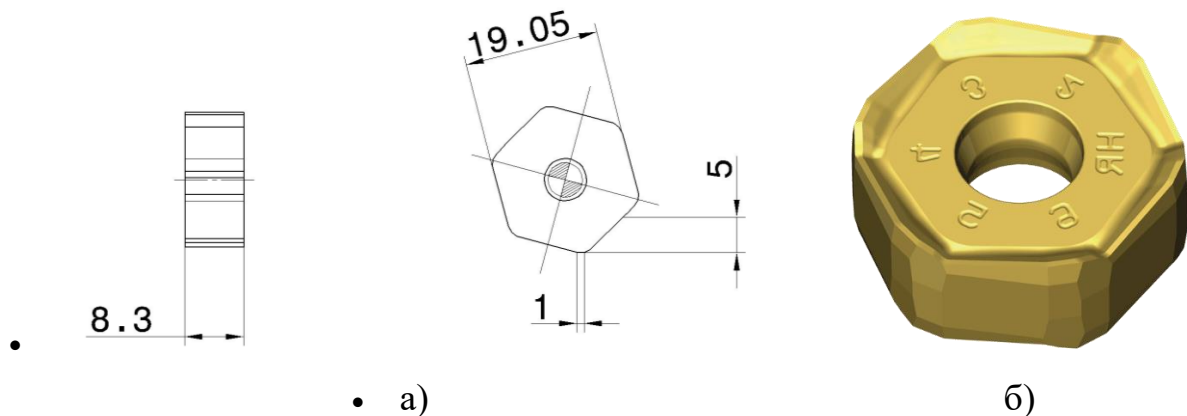


Рис. 2.3 – Пластини форми НХКУ для фрез із максимальною глибиною різання 5 мм

- чорно – жовті TT8625 із покриттям MT-TiCN-Al₂O₃-TiN методом CVD призначені для важкого чорнового фрезерування валів великих діаметрів від Ø125 мм до Ø160 мм. Має підвищену в'язкість основи та стійкість до ударних навантажень (коли фреза працює на удар по чорновій корці або поковці вала). Розрахований на середні швидкості $v_{різ} = 80 \dots 300$ м/хв і витримує велику подачу на зуб.

					КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ	Арк.
						20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тому, узагальнивши характеристики пластин призначаємо межі швидкості різання: $v_{min} = 30$ м/хв, $v_{max} = 390$ м/хв., подачу на зуб $s_z = 0,15$ мм/зуб, при глибині $t = 3$ мм.

2.2 Аналіз та обґрунтування методу отримання заготовки

По базовому техпроцесу заготовку деталі Вал шліцьовий (рис.1.1) отримують із круглого гарячекатаного прокату діаметром 85 мм. З аналогічного розміру прокату, отримують заготовку деталі «Вал лебідки» (рис.1.2) із Сталі 40Х [5]) номінальним діаметром 80 мм та лінійною довжиною 538 мм. Вибір кругляка саме такого габариту зумовлений тим, що максимальний конструктивний діаметр вала становить $\varnothing 80$ мм, і ця поверхня залишається чорною, тобто не підлягає лезовому обробленню (точінню чи шліфуванню) на жодній із подальших технологічних операцій. Оскільки металопрокат, отриманий на прокатних станах, має стабільну круглу форму поперечного перерізу, яка повністю відповідає конфігурації деталі «тіла обертання», використання такого сортаменту є найбільш раціональним з економічної та технологічної точок зору. Це дозволяє суттєво скоротити об'єм зняття стружки, зменшити машинний час і знос інструменту на перших операціях підрізання торців та зацентрування.

2.3 Розрахунок режимів різання

На фрезерно-центрувальному автоматі виконують 2 операції:

- фрезерування торців;
- свердління центральних отворів

Тому, розрахунок виконаємо для трьох ключових випадків, які повністю покривають номенклатуру матеріалів цеху: від важкооброблюваної азотованої сталі до сірого чавуну. Нам потрібно розрахувати наступні технологічні параметри процесу фрезерування:

- теоретичну частоту обертання фрези n , об/хв;

$$n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot D} \quad (2.1)$$

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

де v – рекомендована швидкість різання для різальних пластин без урахування оброблюваності матеріалів;

D – діаметр фрези, м/хв.

$$n_{min90} = \frac{1000 \cdot 30}{\pi \cdot 90} = 106 \text{ об/хв}; \quad n_{max90} = \frac{1000 \cdot 390}{\pi \cdot 90} = 1380 \text{ об/хв}$$

$$n_{min160} = \frac{1000 \cdot 30}{\pi \cdot 160} = 60 \text{ об/хв}; \quad n_{max90} = \frac{1000 \cdot 390}{\pi \cdot 160} = 776 \text{ об/хв}$$

- хвилину подачу s_{x6} , мм/хв;

$$s_{x6} = s_z \cdot z \cdot n \quad (2.2)$$

Для забезпечення продуктивного торцювого фрезерування повинна виконуватися умова:

$$D_{фр} > B \cdot (1,25 \dots 1,5) \quad (2.3)$$

де B – ширина оброблюваної поверхні, мм;

Виходячи з (2.3) максимальний діаметр вала (ширина заготовки) для торцювання фрезою $D_{фр} = 160$ мм повинен бути в межах:

$$d_{заг} = B = \frac{D_{фр}}{1,25 \dots 1,5} = \frac{160}{1,25 \dots 1,5} = 128 \dots 107 \text{ мм} \quad (2.4)$$

Максимальний діаметр обмежений кріпленням верстата $d_{заг} = 125$ мм.

Також необхідно обчислити:

- об'ємну продуктивність фрезерування Q , см³/хв:

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q = \frac{t \cdot B \cdot s_{x\phi}}{1000} \quad (2.5)$$

- основний машинний час обробки T_0 :

$$T_0 = \frac{L \cdot i}{s \cdot n} = \frac{L \cdot i}{s_z \cdot z \cdot n} = \frac{L \cdot i}{s_{x\phi}} \quad (2.6)$$

де $L = l + l_{\text{вріз}} + l_{\text{переб}}$ – довжина ходу інструменту, мм; $l = d_{\text{заг}}$ – фактична довжина оброблюваної поверхні деталі, мм; $l_{\text{вріз}} = 0,5 \cdot (D_{\text{фр}} - \sqrt{D_{\text{фр}}^2 - d_{\text{заг}}^2}) + 2$ – величина врізання інструменту (поки він заглиблюється в метал на робочій подачі); $l_{\text{переб}} = 2$ мм – величина перебігу (вихід інструменту із зони різання, зазвичай беруть 1–3 мм).

Для визначення споживчої потужності різання необхідно знати яку потужність необхідно для зняття 1 см³ матеріалу. За довідковими нормативами металообробки [12, 13, 14, 15] для обраних матеріалів та твердості встановлено такі коефіцієнти питомої енергії різання q , см³/хв:

- для Сталі 45 (170–210 НВ) – $q = 0,042$ кВт.
- для Сталі 40ХН (210–240 НВ) – $q = 0,044$ кВт.
- Азотована сталь 34CrAlMo5-10 (240–280 НВ) – $q = 0,046$ кВт.
- Сірий чавун EN-GJL (180–210 НВ) – $q = 0,044$ кВт.

Тоді обчислюємо необхідну потужність різання, кВт :

$$N_{\text{різ}} = Q \cdot q \quad (2.7)$$

Обчислюємо потужність двигуна, кВт:

$$N_{\text{дв}} = \frac{N_{\text{різ}}}{\eta} \quad (2.8)$$

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2.1 Розрахунок режимів різання

Марка сплаву пластин	TT9080 (PVD)			TT7515 (CVD)						TT8625 (CVD)		
Матеріал заготовки	Нелеговані сталі Сталь 45 (197 HB)			Леговані сталі Сталь 40XH (210 – 240 HB)			Сірий чавун EN-GJL (180 – 210 HB)			Азотована сталь 34CrAlMo5-10 (240 – 280 HB)		
Діаметр заготовки $d_{заг}$, мм	20	60	125	20	60	125	20	60	125	20	60	125
Діаметр фрези $D_{фр}$, мм	90	100	160	90	100	160	90	100	160	90	100	160
Кількість зубів, z	10	12	12	10	12	12	10	12	12	10	12	12
Прийнята швидкість обробки $v_{різ}$, м/хв	220	160	160	320	180	90	40	40	35	50	50	50
Частота обертання шпинделя n , $хв^{-1}$	778	701	438	1132	573	179	142	127	70	177	159	100
Прийнята подача на зуб s_z	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Хвилинна подача $s_{хв}$	1167	1260	787	1910	2063	1290	212	223	144	264	286	180
Об'ємна продукт. фрезерування	70	165	215	102	186	121	13	41	47	16	52	67
Довжина ходу інструменту L	93	112	192	93	112	192	93	112	192	93	112	192
Машинний (основний) час T_o	4,8	7,3	20,1	3,3	6,5	35,7	26,3	29,3	91,9	21,1	23,4	64,3
Коефіцієнт питомої потужності різання q , кВт	0,042	0,042	0,042	0,044	0,044	0,044	0,046	0,046	0,046	0,044	0,044	0,044
Потужність різання $N_{різ}$, кВт	2,94	6,93	9,03	4,48	8,17	5,32	0,59	1,90	2,16	0,70	2,27	2,96
Потужність двигуна $N_{дв}$, кВт	3,46	8,16	10,62	5,28	9,61	6,26	0,69	2,23	2,54	0,82	2,67	3,48
Крутний момент на двигуні $M_{кр}$, Нм	36,1	130,0	270,9	37,8	136,2	283,8	39,6	142,4	296,7	37,8	136,2	283,8
Еф.потужність N_e , кВт	0,13	0,34	0,71	0,20	0,40	0,42	0,03	0,09	0,17	0,03	0,11	0,23

Арк.

КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ

24

Зм. Арк. № докум. Підпис Дата

Для розрахунку головної сили різання P_z скористаємося канонічною міжнародною формулою металообробки, яка пов'язує силу різання з питомим опором матеріалу k_c , глибиною різання t та хвилинною подачею верстата $s_{хв}$. У інженерному аналізі (зокрема, за стандартами Sandvik Coromant та ISO) [11, 12, 14, 15] сила різання безпосередньо пов'язана з ефективною потужністю різання $N_{різ}$, яку ми вже розраховували через питому енергію q для кожного випадку та фактичною швидкістю різання $v_{факт}$:

$$P_z = \frac{60 \cdot 1000 \cdot N_{різ}}{v_{факт}} \quad (2.9)$$

Перевіряємо потужність приводу верстата для обробки деталі на даній операції. Необхідно, щоб:

$$N_{різ} \leq N_{шп} \quad (2.10)$$

2.4 Техніко-технологічне обґрунтування результатів розрахунку режимів різання

Масив даних, отриманий у результаті аналітичного розрахунку режимів різання для чотирьох структурних груп матеріалів заготовок $d_{заг} = 20; 60; 125$ мм, є базою вхідних даних для подальшого проектування та силового синтезу виконавчого механізму фрезерної головки верстата МР-76М. Головною метою попереднього розрахунку є переведення суто технологічних параметрів зняття припуску (глибини, швидкостей, об'ємної продуктивності стружки) у строгі механічні та енергетичні константи (крутні моменти, просторові сили різання, номінальні потужності), під які здійснюватиметься розрахунок геометрії зубчастих передач, валів та опор шпиндельного вузла.

Детальний аналіз та систематизація розрахункових закономірностей дозволили сформувати три взаємопов'язані конструкторські критерії для проектування приводу головного руху:

Розрахунок об'ємної продуктивності фрезерування Q виявив велике розсіювання зняття металу – від мінімальних $13 \text{ см}^3/\text{хв}$ (при торцевому

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						25
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

фрезеруванні сірого чавуну Ø20 мм до екстремального пікового значення 215 см³/хв при швидкісній чорновій обробці припуску $t = 3$ мм по нелегованій Сталі 45 інструментом Ø160 на подачі $s_{хв} = 787$ мм/хв.

Диференційований аналіз споживаної потужності через коефіцієнт питомої енергії різання $q = 0,042 \dots 0,046$ кВт) довів, що чиста потужність різання, яка за фізичним змістом тотожна чистій потужності на фрезерному шпинделі досягає критичних значень у 8,17 кВт (для Сталі 40ХН) та 9,03 кВт (для Сталі 45). З урахуванням механічного ККД зубчастих передач та опор фрезерної головки ($\eta = 0,85$), максимальна необхідна потужність на валу приводного двигуна становить:

$$N_{дв_max} = \frac{N_{різ}}{\eta} = \frac{9,03}{0,85} = 10,62 \text{ кВт}$$

Даний розрахунковий показник є прямим конструкторським обґрунтуванням для заміни оригніального двигуна на сучасний трифазний асинхронний двигун АИР132М4 потужністю 11 кВт або його аналоги (Модифікація 2). Тільки цей габарит здатний забезпечити тривалий режим роботи S1 без теплового перевантаження. Водночас для обробки дрібних валів Ø20 мм – Ø60 мм насадною фрезою Ø90 – Ø100 мм зі сплавом ТТ9080 максимальна споживана потужність на валу мотора не перевищує 3,46–5,28 кВт. Це формує вхідні вимоги для альтернативної, локально-енергоєфективної концепції (Модифікація 1) на базі компактного двигуна АИР112М4 потужністю 5,5 кВт, який на максимальних короткочасних режимах завантаження (до 9,5 кВт при машинному часі $T_o = 4,5$ с працюватиме в безпечному повторно-короткочасному режимі перевантаженням, що допускається стандартами ДСТУ.

Розрахунки сформували чіткий перелік частот обертання шпинделя (табл.2.1). Завдяки високій теплостійкості CVD-покриття пластин ТаeguТес (сплав ТТ7515) на легованій Сталі 40ХН зафіксовано граничну верхню швидкість обертання $n_{max} = 1132$ хв⁻¹. Натомість фрезерування сірого чавуну EN-GJL за умов наявності абразивної ливарної кірки вимагає примусового технологічного зниження швидкості обробки до $v = 35 - 40$ м/хв, що змусило знизити нижню

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

межу частоти обертання шпинделя – $n_{min} = 60 - 70 \text{ хв}^{-1}$.

3. Силовий аналіз навантажень та формування вимог до міцності валів і зачеплень

Крутний момент на вихідному валу електродвигуна є базовим фактором, але для розрахунку міцності елементів редуктора визначальним є крутний момент на самому фрезерному шпинделі $M_{шп}$.

Розрахунок сил різання показав, що при роботі на малих діаметрах крутний момент від сили різання є мінімальним $M_{кр} = 36,1 \dots 39,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Проте при переході на максимальний габарит вала $\varnothing 125 \text{ мм}$ та роботу по високоміцній азотованій сталі марки 34CrAlMo5-10 (твердість 240–280 НВ), а також по сірому чавуну на понижених обертах шпинделя $n=70 \dots 100 \text{ хв}^{-1}$, крутний момент на шпинделі стрімко зростає і досягає свого пікового експлуатаційного значення - $M_{кр_шп} = 270,9 \dots 296,7 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Вихідні дані для проектування та силового розрахунку приводу

Силові фактори, що розраховані у п.2.3 формують масив вихідних даних для проектування фрезерної головки. Колова сила різання, що діє на шпindel, досягає $P_z \approx 4542 \dots 4754 \text{ Н}$ (майже 4,8 кН). Це силове зусилля створює жорстке згинальне та крутильне навантаження. Воно виступає основою для розрахунку діаметра оправки фрези, розрахунку вихідного вала шпинделя на сумісне згинання з крученням, а також для поверочного розрахунку призматичних шпонок на зріз та зминання.

Періодичні імпульси входу зубів фрези із $z=12$ в метал на частоті обертання 1132 хв^{-1} генерують високочастотну динамічну вібрацію збурення спектром 125–220 Гц., що висуває сувору конструкторську вимогу: для гасіння вібрацій вузол кріплення електродвигуна повинен мати максимальну монолітність. У модифікації 2 (11 кВт) це досягається жорстким прямофланцевим монтажем 132-го габариту, а в Модифікація 1 (5,5 кВт) вимагає детального проектування товстостінного чавунного перехідного фланця-адаптера та проміжного перехідного вала типу „тато-мама“ з діаметра 28 мм на 32 мм із легованої Сталі 40Х (HRC 28 – 32), який ліквідує геометричну розбіжність осей без втрати вібростійкості приводу.

Оскільки на першому вхідному ступені коробки швидкостей закладено постійну конічну пару коліс з обмеженням передавального відношення $i_{\text{кон}} = 2,0$, виникнення просторових осьових та радіальних сил у конічному евольвентному зачепленні формує вимогу застосувати для опор першого та другого валів редуктора радіально-упорні конічні роликотідишпники, які здатні повністю сприйняти осьовий розпір конусів під піковим навантаженням.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	3 КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗДІЛ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Бублик В.В.</i>						
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					28	18
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>				<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

3.2 Опис конструкції та принципу роботи фрезерувальної головки.

Фрезерно-центрувальні двосторонні автомати є двох типів – із однимісним столом (MP-71, MP- MP-71M, MP-73 і MP-75) і трьохмісним барабаном – MP-76. В верстатах на базі мод. MP-71 фрезерна і свердлильна головки розташовані в єдиному корпусі, а їх осі розташовані на одній горизонталі. Рух переміщення лівого і правого корпусів синхронізує гідроциліндр через шліцьовий вал, шестерні і рейки. Для приводу фрез і свердла є окремі електричні асинхронні двигуни фланцевого кріплення (IM3081).

У мод. MP-76 із барабаном завантажувальним пристроєм ліва головка не рухома, а рух виставлення на розмір виконує права головка разом із коробкою привода. Конструктивно, коробки ідентичні для всіх моделей верстатів. Зміна швидкостей обертання шпинделів виконують через гітару змінних зубчастих коліс. Цикл роботи головки забезпечується системою електромагнітів та кінцевих вимикачів, які реалізують швидкий підвід, робочий хід й швидке відведення.

3.3 Опис компонувальних та конструктивно-експлуатаційних можливостей верстату

Першим етапом модернізації фрезерувальної головки верстат мод. 2Г942є заміна старого електродвигуна АО2-4-4 з потужністю 5 кВт на більш потужніший 5,5 кВт мод. АИР112М4, АИР132М4 або аналогічних серії 4А. Характеристики двигунів наведено у табл.3.1. Приводи фрезерних головок оснащувалися двигунами на 7,5 кВт або 10 кВт. Альтернативні двигуни наведено у табл.3.2.

Таблиця 3.1 Характеристики двигунів аналогів $N=5,5$ кВт і $n_{ном}=1500$ об/хв.

Технічний параметр	Базовий двигун	Модернізована серія		аналог (ЕС, Premium)	(Німеччина, High)
Маркування моделі	АО2-42-4	4А112М4	АИР112М4	ABB M3AA 112M 4	Siemens 1LE1001-1CB2
Номінальна потужність, кВт	5,0	5,5	5,5	5,5	5,5
Частота обертання (факт.), об/хв	1450	1450	1445	1450	1455
Режим роботи за ISO	S1 (тривалий)				
ККД двигуна, %	83,5	85,5	85,5	89,2 (Клас ІЕ3)	87,7 (Клас ІЕ2)

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Висота осі обертання (H), мм	132	112	112	112	112
Діаметр вихідного вала (D), мм	32			28 (стандарт DIN)	
Довжина вильоту вала (E), мм	80	60	60	60	60
Зовнішній діаметр фланця, мм	300	250	250	250	250
Діаметр посадкового замка, мм	230	180	180	180	180
Коло отворів кріплення, мм	265	215	215	215	215
Маса двигуна, кг	~68	~54	~45	~37 (алюміній)	~41

Таблиця 3.2 Характеристики двигунів аналогів N=11 кВт і $n_{ном}=1500$ об/хв.

Технічний параметр	Базовий двигун	Проміжна модернізована серія	ДСТУ	(ЕС, Premium)	(Німеччина, High)
Маркування моделі	АО2-51-4 (або АО2-52-4)	АІР132S4	АІР132М4	Siemens 1LE1001-1DB2	ABB M3AA 132S 4
Номінальна потужність, кВт	7,5 (або 10,0)	7,5	11,0	7,5	7,5
Режим роботи за ISO/ГОСТ	S1 (тривалий)				
Висота осі обертання (H), мм	132	132 (збігається)			
Діаметр вихідного вала (D), мм	38	38 (збігається)			
Довжина вильоту вала (E), мм	80	80 (збігається)			
Зовнішній діаметр фланця, мм	300	300 (збігається)			
Діаметр посадкового замка, мм	230 (збігається)				
Коло отворів кріплення, мм	265	265 (збігається)	265 (збігається)	265 (збігається)	265 (збігається)
Маса електродвигуна, кг	~82	~56	~68	~52	~48

3.4 Кінематичний розрахунок фрезерної головки

На цьому верстаті передбачається обробляти заготовки діаметром від 25 мм до 125 мм. Розмір фрез згідно із паспортними даними:

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$D_{max} = 160 \text{ мм і } D_{min} = 90 \text{ мм.}$$

Рекомендована швидкість різання для пластин:

- TT9080 (TiAlN-TiN):

$$v_1 = 45 \text{ м/хв}; \quad v_2 = 300 \text{ м/хв};$$

- TT7515 (TiCN-Al₂O₃-TiN):

$$v_3 = 30 \text{ м/хв}; \quad v_4 = 380 \text{ м/хв};$$

- TT8625 (MTCN-Al₂O₃-TiN):

$$v_5 = 80 \text{ м/хв}; \quad v_6 = 300 \text{ м/хв};$$

Тоді приймаємо:

$$v_{min} = v_3 = 30 \text{ м/хв}; \quad v_{max} = v_4 = 380 \text{ м/хв}$$

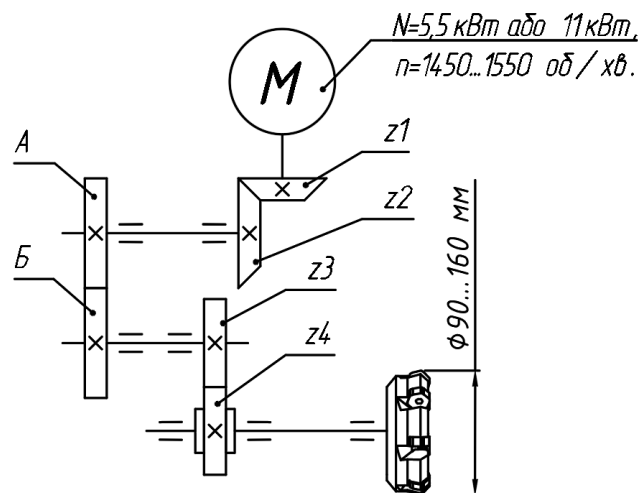


Рис. 3.1

Визначаємо мінімальну і максимальні частоти обертання:

$$n_{min} = \frac{1000 \cdot v_{min}}{\pi \cdot D_{max}} = \frac{1000 \cdot 30}{\pi \cdot 160} = 59,68 \text{ об/хв.} \quad (3.1)$$

$$n_{max} = \frac{1000 \cdot v_{max}}{\pi \cdot D_{min}} = \frac{1000 \cdot 380}{\pi \cdot 90} = 1379 \text{ об/хв.} \quad (3.2)$$

визначаємо найважливіший параметр приводу головного руху – діапазон регулювання частот обертання джерела R_n :

					КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ	Арк.
						31
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$R_n = \frac{n_{max}}{n_{min}} = \frac{1379}{59,68} = 23,11 \quad (3.3)$$

Для визначення кількості ступенів частот обертання шпинделя приймаємо $\varphi = 1,41$. Тоді

$$Z = 1 + \frac{\log(R_n)}{\log(\varphi)} = \frac{1,36}{0,15} = 10,14 \quad (3.4)$$

Приймаємо $Z = 9$.

Для переналадки верстата на різні режими використовують гітару змінних коліс. Виходячи з цього будуємо структурну сітку.

$$i_1 := \varphi = 1.41 \quad i_2 := \varphi^2 = 1.99 \quad i_3 := \varphi^3 = 2.80 \quad i_4 := \varphi^4 = 3.95 \quad i_5 := \varphi^5 = 5.57$$

$$i_6 := \frac{1}{\varphi^2} = 0.50 \quad i_7 := \frac{1}{\varphi^3} = 0.36 \quad i_8 := \frac{1}{\varphi^4} = 0.25 \quad i_9 := \frac{1}{\varphi^5} = 0.18$$

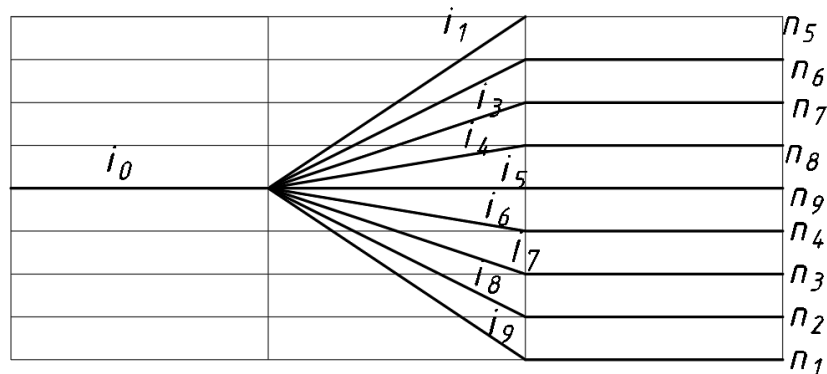


Рис. 3.2 Структурна сітка

$$n := 1500 \cdot \frac{22}{44} \cdot [i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4 \ i_5 \ i_6 \ i_7 \ i_8 \ i_9]^T \cdot \frac{29}{71} = \begin{bmatrix} 431.937 \\ 609.031 \\ 858.733 \\ 1210.814 \\ 1707.247 \\ 154.086 \\ 109.281 \\ 77.504 \\ 54.967 \end{bmatrix}$$

Для модернізації фрезерної головки необхідно підібрати такий набір зубчастих коліс і вписати його в фактичні розміри корпусу фрезерної головки.

Передавальні числа мають бути в межах від 1/4 до 2.

Після обрахунків в Mathcad Prime 11 ми отримали наступний ряд частот і пар зубчастих коліс:

$$n := 1500 \cdot \frac{22}{44} \cdot \left[\frac{21}{79} \frac{27}{73} \frac{35}{65} \frac{42}{58} \frac{50}{50} \frac{58}{42} \frac{65}{35} \frac{73}{27} \frac{79}{21} \right]^T \cdot \frac{29}{71} = \begin{bmatrix} 81.432 \\ 113.303 \\ 164.951 \\ 221.831 \\ 306.338 \\ 423.038 \\ 568.913 \\ 828.247 \\ 1152.414 \end{bmatrix}$$

Маючи числа зубів будемо графік чисел обертів

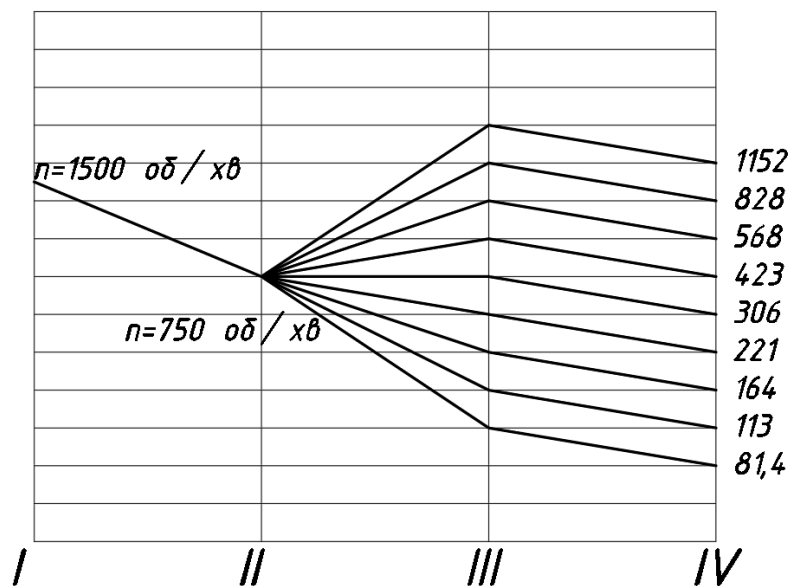


Рис. 3.3 Графік число обертів

3.5 Геометричний розрахунок зубчастих коліс

3.5.1 Геометричний розрахунок конічної пари

Виконаємо геометричний розрахунок конічної пари (22/44)

1. Кути ділительних конусів δ_1 та δ_2 визначають нахил твірної конуса до осі обертання і необхідні для налаштування кута обточування заготовки:

- для ведучої конічної шестірні $z_{k1} = 22$

$$\delta_1 = \arctg \left(\frac{z_{k1}}{z_{k2}} \right) = \arctg \left(\frac{22}{44} \right) = \arctg (0,5) \approx 26^\circ 34'$$

для веденого конічного колеса $z_{к2} = 44$:

$$\delta_2 = 90^\circ - \delta_1 = 90^\circ - 26^\circ 34' = 63^\circ 26'$$

2. Зовнішні ділильні діаметри d_e

Визначаємо теоретичні діаметри зачеплення у зовнішньому торцевому перерізі:

Діаметр шестірни:

$$d_{e1} = m_{te} \cdot z_{к1} = 3,0 \cdot 22 = 66,0 \text{ мм}$$

Діаметр колеса:

$$d_{e2} = m_{te} \cdot z_{к2} = 3,0 \cdot 44 = 132,0 \text{ мм}$$

3. Зовнішня конусна відстань R_e

Визначає лінійну відстань від зовнішнього торця зубів до теоретичної точки перетину осей валів приводу:

$$\begin{aligned} R_e &= 0,5 \cdot m_{te} \cdot \sqrt{z_{к1}^2 + z_{к2}^2} = 0,5 \cdot 3,0 \cdot \sqrt{22^2 + 44^2} = 1,5 \cdot \sqrt{484 + 1936} \\ &= 1,5 \cdot \sqrt{2420} \approx 73,79 \text{ мм} \end{aligned}$$

4. Ширина зубчастого вінця коліс b

Згідно з нормативами проектування конічних редукторів, ширина вінця прямозубих коліс повинна задовольняти умову

$$b \leq 0,3 \cdot R_e \text{ або } 10 \cdot m_{te} \rightarrow (b \leq 0,3 \cdot 73,79 = 22,14 \text{ мм})$$

Приймаємо стандартне округлене значення: $b = 22,0 \text{ мм}$.

5. Середня конусна відстань R_m та середній коловий модуль m_m

Ці параметри характеризують геометрію зуба в його середньому перерізі та

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

використовуються конструктором для перевірочних розрахунків зубів на згин та контактну втому:

Середня конусна відстань:

$$R_m = R_e - 0,5 \cdot b = 73,79 - 0,5 \cdot 22 = 62,79 \text{ мм}$$

Середній коловий модуль зачеплення:

$$m_m = m_{te} \cdot \frac{R_m}{R_e} = 3,0 \cdot \frac{62,79}{73,79} \approx 2,55 \text{ мм}$$

6. Зовнішні діаметри вершин зубів d_{ae}

Це максимальний габаритний діаметр деталей, який токар суворо контролює при обточуванні конічних заготовок перед безпосереднім нарізанням зубів у зубофрезерному цеху:

Для ведучої шестірні (на валу двигуна):

$$\begin{aligned} d_{ae1} &= d_{e1} + 2 \cdot m_{te} \cdot \cos \delta_1 = 66 + 2 \cdot 3,0 \cdot \cos(26^\circ 34') = 66 + 6,0 \cdot 0,8944 \\ &= 71,37 \text{ мм} \end{aligned}$$

Для веденого колеса (на першому валу гітари):

$$\begin{aligned} d_{ae2} &= d_{e2} + 2 \cdot m_{te} \cdot \cos \delta_2 = 132 + 2 \cdot 3,0 \cdot \cos(63^\circ 26') = 132 + 6,0 \cdot 0,4472 \\ &= 134,68 \text{ мм} \end{aligned}$$

7. Висота елементів зуба у зовнішньому перерізі

висота головки конічного зуба:

$$h_{ae} = m_{te} = 3,0 \text{ мм.}$$

Висота ніжки конічного зуба (з урахуванням радіального зазору):

$$h_{fe} = 1,2 \cdot m_{te} = 1,2 \cdot 3,0 = 3,6 \text{ мм}$$

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Повна висота зуба кінчної пари:

$$h_e = h_{ae} + h_{fe} = 3,0 + 3,6 = 6,6 \text{ мм}$$

3.5.2 Геометричний розрахунок коліс гітари (2-й ступінь, $m = 2,0$)

Оскільки у вас 5 унікальних фізичних пар шестерень, розрахуємо розміри для кожного колеса з вашого набору. Завдяки сумі 100 зубів міжосьова відстань для будь-якої комбінації завжди дорівнює:

$$a_w = \frac{m \cdot (a + b)}{2} = \frac{2,0 \cdot 100}{2} = 100 \text{ мм}$$

Формули для розрахунку кожного колеса:

ділительний діаметр: $d = m \cdot z$

Діаметр вершин зубів (зовнішній): $d_a = d + 2 \cdot m = m \cdot (z + 2)$

Діаметр впадин зубів: $d_f = d - 2,5 \cdot m = m \cdot (z - 2,5)$

Виконаємо атоматизований розрахунок із використанням таблиць Excel (табл. 3.3)

Таблиця 3.3 Таблиця геометрії змінних шестерень гітари

Число зубів колеса (z)	Ділительний діаметр (d), мм	Діаметр виступів (d _a), мм	Діаметр запади (d _f), мм	Ширина вінця 10*m, мм
21	42	46	37	20
27	54	58	49	20
35	70	74	65	20
42	84	88	79	20
50	100	104	95	20
58	116	120	111	20
65	130	134	125	20
73	146	150	141	20
79	158	162	153	20

3.5.3 Геометричний розрахунок вихідної пари (3-й ступінь)

Ця пара безпосередньо обертає фрезерний шпиндель, тому вона розрахована

за посиленням модулем 3,0 мм для передачі пікового моменту до 296,7 Н·м.

Виконаємо перевірку міжосьової відстані: a_{w3} :

$$a_{w3} = \frac{m_3 \cdot (z_3 + z_4)}{2} = \frac{3,0 \cdot (29 + 71)}{2} = \frac{3,0 \cdot 100}{2} = 150 \text{ мм}$$

1. Шестірня ($z_3 = 29$) (ведуча циліндрична):

Ділильний діаметр:

$$d_3 = 3,0 \cdot 29 = 87,0 \text{ мм}$$

Діаметр вершин зубів:

$$d_{a3} = 87,0 + 2 \cdot 3,0 = 93,0 \text{ мм}$$

Діаметр западин зубів:

$$d_{f3} = 87,0 - 2,5 \cdot 3,0 = 79,5 \text{ мм}$$

Колесо ($z_4 = 71$) насаджена на фрезерний шпиндель:

Ділильний діаметр:

$$d_4 = 3,0 \cdot 71 = 213,0 \text{ мм}$$

Діаметр вершин зубів:

$$d_{a4} = 213,0 + 2 \cdot 3,0 = 219,0 \text{ мм}$$

Діаметр западин зубів:

$$d_{f4} = 213,0 - 2,5 \cdot 3,0 = 205,5 \text{ мм}$$

Ширина вінця вихідної пари b_3 : Приймається посиленою для жорсткості:

$$b_3 = 35 \text{ мм.}$$

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						37
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

3.6 Розрахунок динамічних параметрів процесу торцювання

При максимальних обертах (1152 об/хв) імпульси входу 10 або 12 зубів фрези в метал генерують високочастотну вібрацію. Ця вібрація виникає безпосередньо через обертання самого вала шпинделя, оправки та фрези. Вона генерується, якщо є хоча б мінімальний залишковий дисбаланс деталей після балансування. Це найбільш небезпечна вимушена вібрація, яка безпосередньо навантажує різальні кромки пластин. Коли зуб фрези при обертанні циклічно б'є по торцю циліндричної заготовки, створюючи періодичний синусоїдальний імпульс сили різання.

Розрахуємо частоту вимушених коливань:

$$f_{\text{шп}} = \frac{n}{60}$$

- для фрези зі сплавом ТТ9080 ($z=10$ зубів)

$$f_{\text{шп}} = \frac{1152}{60} = 19,2 \text{ Гц}$$

Частота вимушених коливань становить:

$$f_{\text{зуб}_{10}} = f_{\text{шп}} \cdot z = 19,2 \text{ Гц} \cdot 10 = 192 \text{ Гц}$$

- для фрез зі сплавами ТТ7515 та ТТ8625 ($z=12$ зубів)

Через більшу кількість зубів удари відбуваються частіше кожні 0,0045 секунди, що зміщує вібраційний фон у вищий частотний спектр:

$$f_{\text{зуб}_{12}} = f_{\text{шп}} \cdot z = 19,2 \text{ Гц} \cdot 12 = 230,4 \text{ Гц}$$

3.7 Перевірочний розрахунок зубів на міцність

3.7.1 Розрахунок зубів на контактну міцність

Розрахунок проведено для найважчого, лімітуючого випадку в редукторі –

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						38
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

вихідної циліндричної прямозубої пари 3-го ступеня ($z_3 = 29$, $z_4 = 71$), яка безпосередньо передає пікове навантаження на фрезерний шпиндель при обробці заготовки $\varnothing 125$ мм з азотованої сталі 34CrAlMo5-10.

крутний момент на шпинделі (колесі z_4):

$$M_{\text{шп}} = 296,7 \text{ Н} \cdot \text{м} = 296700 \text{ Н} \cdot \text{мм}.$$

Крутний момент на ведучій шестірні z_3 :

$$M_3 = \frac{M_{\text{шп}}}{i_3} = \frac{296,7}{\frac{71}{29}} = \frac{296,7}{2,4483} \approx 121,2 \text{ Н} \cdot \text{м} = 121200 \text{ Н} \cdot \text{мм}$$

Дільний діаметр шестірні: $d_3 = 87$ мм.

Ширина вінця вихідної пари: $b_3 = 35$ мм, модуль: $m_3 = 3,0$ мм.

Матеріал коліс: легована Сталь 40X із покращенням та об'ємним гартуванням.

Твердість поверхні зубів: HB 280.

Допустимі контактні напруження: $[\sigma]_H = 580$ МПа.

Допустимі напруження згину: $[\sigma]_F = 240$ МПа.

Коефіцієнт динамічного навантаження: $K_{H\beta} = K_{F\beta} = 1,15$, $K_{H\nu} = K_{F\nu} = 1,1$.

3.7.2 Розрахунок зубів на контактну втому (запобігання викришуванню)

Контактні напруження евольвентних поверхонь прямозубих коліс σ_H розраховуються за формулою:

$$\sigma_H = 270 \cdot \sqrt{\frac{F_t \cdot (i_3 + 1)}{d_3 \cdot b_3 \cdot i_3} \cdot K_H}$$

1. Визначимо колову силу в зачепленні F_t :

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						39
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_t = \frac{2 \cdot M_3}{d_3} = \frac{2 \cdot 121200}{87} = 2786,2 \text{ Н}$$

2. Сумарний коефіцієнт навантаження K_H :

$$K_H = K_{H\beta} \cdot K_{H\nu} = 1,15 \cdot 1,1 = 1,265$$

3. Обчислимо діючі контактні напруження σ_H :

$$\sigma_H = 270 \cdot \sqrt{\frac{2786,2 \cdot (2,45 + 1)}{87 \cdot 35 \cdot 2,45}} \cdot 1,265 = 344,7 \text{ МПа}$$

4. Перевірка умови міцності:

$$\sigma_H = 344,7 \text{ МПа} \leq [\sigma]_H = 580 \text{ МПа}$$

3.7.3 Розрахунок зубів на втому від згину (запобігання зламу)

Розрахунок напружень згину в небезпечному перерізі при основі зуба шестірні σ_F виконується за формулою:

$$\sigma_F = \frac{F_t \cdot Y_F}{b_3 \cdot m_3} \cdot K_F$$

1. Коефіцієнт форми зуба Y_F залежить від еквівалентного числа зубів. Для прямозубої шестірні з $z_3 = 29$ за довідковими таблицями: ($Y_{F1} = 3,92$).
2. Сумарний коефіцієнт навантаження K_F :

$$K_F = K_{F\beta} \cdot K_{F\nu} = 1,15 \cdot 1,1 = 1,265$$

3. Обчислимо діючі напруження згину σ_F :

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\sigma_F = \frac{2786,2 \cdot 3,92}{35 \cdot 3,0} \cdot 1,265 = 131,6 \text{ МПа}$$

4. Перевірка умови міцності:

$$\sigma_F = 131,6 \leq [\sigma_F] = 240 \text{ МПа}$$

Висновок: Умова міцності на згин повністю виконується (запас становить 45%). Злам зубів під дією робочих та пускових навантажень виключений.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						41
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Інструкція з техніки безпеки при роботі на фрезерно-центрувальному автоматі

Безпека праці на напівавтоматах досягається відповідністю їхнім вимогам ДСТУ 12.2.009-80, а також наступним конкретизованим вимогам:

1. Внутрішні поверхні корпусів коробка подачі і редуктора головного руху напівавтомата пофарбовані в золотаво-жовті сигнальні кольори.
2. Вся зона обробки закрита кільцевим огороженням.
3. Механізм подачі супорта має кулачкову запобіжну муфту, що забезпечує «вистій» і наступний відвід супорта при виникненні перевантажень.
4. Переміщення супортів обмежується в крайніх положеннях шляховими вимикачами, що дають команди на зупинку подачі.
5. У гідравлічному приводі патрона передбачені зворотні клапани, що виключають падіння тиску в гідравлічному приводі, у випадку припинення подачі масла.
6. Керування затискними механізованими пристроями можливо тільки на завантажувальній позиції, де відсутній привод обертання шпинделя.
7. Корегований рівень звукової потужності не повинен перевищувати 108 дБ.
8. Вступні вимикачі постачені покажчиком у вигляді миготливого індикаторного пристрою, що показує стан його контактів.
9. На електрошафі встановлений знак напруги за ДСТУ 12.4.027-76.
10. Двері електрошафи напівавтомата захищаються спеціальними замками.
11. На напівавтоматах є кнопки «Стоп» з фіксацією (аварійна) із грибоподібним штовхачем червоних кольорів, збільшеного розміру, установлена на пультах позицій і на електрошафі.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Змн.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	<i>Лім.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
<i>Розроб.</i>		<i>Бублик В.В.</i>					42	8
<i>Перевір.</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>				<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр.МВ-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Затверд.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

12. Відповідно до ДСТУ 14254-80 шафи електроустаткування й клемні коробки мають виконання по ступені захищеності IP54.

Пульты керування мають ступінь захищеності IP44.

13. Напівавтомати відповідають вимогам ДСТУ 12.2.049-80.

Поряд з дотриманням загальних правил й інструкцій з техніки безпеки необхідно керуватися рядом вимог, пов'язаних з конструктивними особливостями напівавтомата.

Небезпечною зоною верстата є всі робочі позиції.

Кільцеве розташування позицій утрудняє огляд частини з них. Верстат має дублюючі кнопки на всіх позиціях. Тому працювати на верстаті можна лише виключивши можливість впливу сторонніх осіб на органи керування. При спільній роботі (оператор, наладчик й ін.) всі дії персоналу повинні бути погоджені.

Вилучені позиції обслуговуються при обході верстата, тому прохід довкола нього повинен бути вільний.

При порушенні роботи позицій поблизу від оператора супорт відводять рукояткою командоапарата. Спроба оббігання верстата для такої ж дії на окремій позиції може привести до падіння й травм. У цьому випадку необхідно виключити подачу на всіх позиціях вимикачем на головному пульті керування або зробити аварійне вимикання верстата.

Основні механізми розташовані високо від настилу.

Для доступу до них потрібне застосування пристосувань, що забезпечують безпеку й зручність роботи на висоті. Неприпустимо працювати, балансуючи на огороженні або використовуючи як підставка випадкові предмети (тару, заготівлі й т.п.).

Зручні легкі переносні площадки, що опираються на елементи напівавтоматів (огороження, нижній вінець і т.п.). Низькі площадки застосовуються, в основному, для настроювання верстата, високі - для ремонтних робіт.

Після закінчення робіт у верхній частині напівавтомата необхідно перевірити відсутність сторонніх предметів й установку шплінтів на кінцях валів змінних шестірень і закрити щитки огороження, забезпечені від випадання

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						43
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ланцюжком, що оперізує.

Небезпечне випадання заготівлі із затискного пристосування (це приводить також до ушкоджень верстата). Для запобігання цього необхідно дотримувати правила обслуговування гідросистеми напівавтомата, стежити за справністю оснащення, відбракувати заготівлі зі збільшеними припусками й іншими дефектами.

Затискні пристосування, що приводять гідроциліндром, як правило, не мають самогальмування. Після включення верстата треба переконатися в надійному закріпленні заготівель і лише після цього починати обробку.

При застосуванні свердлильних головок варто враховувати, що їхня робоча частина починає обертатися одночасно з електродвигуном головного привода до включення шпинделів.

При використанні електромеханічного ключа не можна починати поворот стола, не вивівши його із затискного пристосування. Для захисту від стружки й бризів СОЖ на робочих позиціях застосовують додаткові щитки, установлені на основне огороження верстата.

4.2 Охорона навколишнього середовища при роботі на фрезерно-центрувальному обладнанні

Сучасні ЗМОР являють собою складні багатокомпонентні композиції, що відповідають комплексу вимог до їх технологічних і супутніх властивостей. Досвід передових машинобудівних заводів показує, що ефективні ЗМОР дозволяють в 1,2-4 рази підвищити стійкість інструменту, на 20-60% форсувати режими різання, на 10-50% підвищити продуктивність праці, зменшити енерговитрати при механообробці. Але в процесі багаторазового використання при механічній обробці металів ЗМОР втрачають свої технологічні властивості. У результаті нагромадження металевих часток і продуктів термічного розкладання масел, продуктів їхнього окислювання, утворення смол – знижується ефективність застосування ЗМОР. Крім того, емульсія збіднюється за рахунок виносу емульсола зі стружкою. Включення в ЗМОР масел, змащень і та спецрідин з гідравлічних систем і верстатів, підвищення вмісту солей твердості у водній фазі

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		44

(випарювання води з емульсії й внесення солей твердості при додаванні води), мікробіологічна поразка (загнивання) – все це приводить до руйнування ЗМОР, і виникає необхідність у її заміні й наступній утилізації.

Найбільш часто використовуваним методом з попереднім очищенням від механічних домішок є реагентний метод розкладання відпрацьованих емульсій. Його основним плюсом є простота реалізації технологічного процесу, доступне устаткування й матеріали.

На ряді великих підприємств ВАТ «АВТОВАЗ» - діють технологічні системи утилізації ЗМОР із застосуванням реагентів-коагулянтів, флокулянтів, мінеральних кислот і лугів.

Однак залишкові концентрації забруднюючих речовин у водній фазі після розкладання ЗМОР досить великі, у десятки разів перевищуючи встановлене гранично припустиме скидання (ПДС) – $C_{\text{нафтопрод}} = 10-100$ мг/л при $\text{ПДС}_{\text{нафтопрод}} = 0,5-1,2$ мг/л.

Для комплексної утилізації ЗМОР пропонується використати гідрофобізовані порошки (ГФП) на основі природних сорбентів (діатоміту, опоки). Установлено можливість й ефективність їхнього застосування, як для руйнування відпрацьованої емульсії, так і для очищення водної й масляної фаз. Пропонований сорбційний метод руйнування емульсій володіє рядом переваг у порівнянні з реагентним методом:

- зниження собівартості розкладання 1 м³ відпрацьованої ЗМОР на 80-90%;
- більша ефективність поділу емульсії на водну й масляну фази;
- залишковий вміст основної забруднюючої речовини у водній фазі нафтопродуктів не перевищує 1...2 мг/л замість 10...50 мг/л для реагентного методу;
- більш ефективне видалення аніонів, катіонів (до норм ПДС, установлених для підприємства);
- застосування природної сировини при виготовленні гідрофобізованих порошків скорочує витрати й запобігає забрудненню навколишнього середовища при здійсненні технологічного процесу розкладання ЗМОР;
- одержувані продукти розкладання ЗМОР вода й масло відповідають

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

вимогам, пропонованим для подальшого використання їх у техпроцесах;

- значне зниження відходів з переробки 1 м³ відпрацьованої ЗМОР, крім того, самі забруднені порошки можуть піддаватися термічній регенерації, або використатися в дорожнім будівництві як заміник гудрону.

Під комплексною утилізацією ЗМОР ми розуміємо сукупність технологічних процесів переробки відпрацьованої емульсії й всіх продуктів її розкладання з повним або частковим поверненням їх у виробництво.

Питома вартість переробки 1 м³ ЗМОР значно зменшується до 20-50 грн./м³ за рахунок повернення у виробництво сировинних ресурсів - води й масла. Собівартість переробки 1 м³ відпрацьованої ЗМОР у наведені вище прикладах реагентним методом досягає 200-250 грн.

Вода становить приблизно 90-95 % від загального обсягу вступника на утилізацію емульсії. При здійсненні додаткового очищення до необхідних норм вода може бути використана в інших технологічних процесах.

При розкладанні ЗМОР масло утвориться в обсязі 3-5% від вихідного обсягу. При додатковому очищенні його можна застосовувати в такий спосіб:

- у якості технологічних мастильних матеріалів у ливарному виробництві; у вигляді палива для котелень і ТЭЦ;
- добавка до бітумів; сировина для обмаслювання металургійних порошків у сталеливарному виробництві;
- як сировина для виробництва керамзиту;
- як мастильні матеріали для форм при виробництві залізобетону.

Шлами й опади після просушки й прожарювання можна додавати до будівельних матеріалів, при великому змісті металевих часток проводити магнітну сепарацію й витягнуті феромагнітні частки пресувати в брикети для подальшого переплавлення.

Таким чином, реалізація сорбентного методу руйнування емульсії з використанням ГФП, доочищення водної й масляної фаз після розкладання ЗМОР із застосуванням вивчених матеріалів дозволить перейти на більше ефективний технологічний процес утилізації, що істотно знизить навантаження підприємства на навколишнє середовище.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення ефективності, гнучкості та продуктивності механічного оброблення циліндричних деталей на етапі заготівельно-підготовчих операцій. На основі проведених досліджень, аналітичних розрахунків та конструкторських розробок сформувано такі загальні висновки:

1. Технологічно обґрунтовано доцільність переведення спеціального фрезерно-центрувального верстата лінійного типу на прогресивний високопродуктивний твердосплавний інструмент із сучасними зносостійкими покриттями. Це дозволило оптимізувати процес зняття чорнового припуску, забезпечити однопрохідне торцювання суцільних перерізів заготовок та створити надійну геометричну базу для подальшої прецизійної обробки на токарних центрах із ЧПК.
2. Здійснено силово-кінематичний аналіз умов різання для всього номенклатурного ряду конструкційних матеріалів цеху, за результатами якого визначено граничні експлуатаційні зони роботи обладнання. Виявлено лімітуючі швидкісні та силові режими обробки, які було використано як вихідне технічне завдання для подальшого проектування та розрахунку елементів головного приводу верстата.
3. Синтезовано оптимальну геометричну структуру триступеневої коробки швидкостей фрезерної головки. Конструктивне впровадження уніфікованої гітари змінних коліс із раціональним силовим модулем і фіксованою міжосьовою відстанню забезпечило плавний дискретний ряд частот обертання шпинделя з повним виконанням граничних умов ДСТУ щодо відсутності підрізання ніжок зубів евольвентного профілю шестерень.
4. Розроблено та всебічно обґрунтовано дві альтернативні концепції модернізації приводу головного руху: модульну енергоефективну на базі компактного електродвигуна меншого габариту та силову максимальну на базі потужного приводного мотора. Для реалізації енергоефективного варіанта спроектовано оригінальні адаптаційні елементи — жорсткий перехідний фланець-адаптер та ступінчастий проміжний перехідний вал, які

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						47
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ліквідують геометричну розбіжність приєднувальних осей без втрати жорсткості стиків. Силовий варіант забезпечує прямий монтаж двигуна і максимальну довговічність при безперервній експлуатації.

5. Проведено аналіз динамічної стійкості спроектованої конструкції фрезерної головки. Доведено, що вимушені коливання від переривчастих ударів зубів інструменту лежать значно нижче зони власного резонансу системи, а виникнення автоколивань надійно блокується впровадженням фрез із нерівномірним окружним кроком зубів у поєднанні з високою демпфуючою здатністю чавунної станини верстата. Це гарантує стабільність робочих обертів і високу якість оброблених торців

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						48
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Кваліфікаційна робота бакалавра: структура, вимоги до виконання та захист. Методичні рекомендації для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти за освітньо-професійною програмою «Галузеве машинобудування» зі спеціальності 133 Галузеве машинобудування галузі знань 13 Механічна інженерія для здобувачів всіх форм здобуття освіти / уклад.: Р. А. Скляров, В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, Р. Я. Лещук, А. А. Сенік, В. В. Шанайда, А. В. Гагалюк, В. М. Буховець. – Тернопіль : ТНТУ, 2025. 78 с.
2. ДСТУ 7809:2015 Прокат сортовий, калібрований зі спеціальним обробленням поверхні з вуглецевої якісної конструкційної сталі. Загальні технічні умови. Чинний від 2016-04-01. 24 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=64320
3. ДСТУ 7806:2015 Прокат із легованої конструкційної сталі. Технічні умови. Чинний від 2016-04-01. 49 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=64466
4. ДСТУ EN 10085:2014 Азотовані сталі. Технічні умови постачання (EN 10085:2001, IDT). Чинний від 2016-01-01. 28 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=93282
5. ДСТУ EN ISO 683-1:2022 Сталі, що піддають термічному обробленню, леговані сталі та сталі вільного різання. Частина 1. Нелеговані сталі для загартування та відпустки (EN ISO 683-1:2018, IDT; ISO 683-1:2016, IDT). Чинний від 2023-12-31. 46 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=106016
6. Гевко Б. М., Матвійчук А. В., Артюхов А. М., Пік А. І., Гагалюк А. В., Лотоцький Р. І. Технологія обробки на верстатах з ЧПК. - Тернопіль: Крок, 2014. – 131 с.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>			
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>				
<i>Розробив</i>		<i>Бублик В.В.</i>			ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Аркушів</i>
<i>Перевірів</i>		<i>Гагалюк А.В.</i>					49	
<i>Рецензент</i>						<i>ТНТУ ім.І.Пулюя, гр. МВ-41</i>		
<i>Н. контр.</i>		<i>Кобельник В.Р.</i>						
<i>Зав.каф.</i>		<i>Крупа В.В.</i>						

7. Analysis of the stress-strain state of the vehicle frame by finite element method // Mykola Stashkiv, Ivan Pidgurskyi, Oleh Pidluzhnyi, Mykola Pidgurskyi, Mykhaylo Levkovych, Ruslan Skliarov, Andriy Mushak // Scientific Journal of TNTU. – Tern.: TNTU, 2022. – Vol 108. – No 4. – P. 89–102.
8. Nahalyuk A., Krupa V. Modeling of a lathe bed using the method of topological optimization. Scientific journal of the Ternopil national technical university. 2023. Vol. 111, no. 3. P. 67–75. URL: https://doi.org/10.33108/visnyk_tntu2023.03.067
9. Improved Method for Determining the Feed Influence on the Tangential Cutting Force During Re-drilling, Countersinking and Boring Based on the Small Sample Theory / V. Krupa et al. Periodica Polytechnica Mechanical Engineering. 2024. URL: <https://doi.org/10.3311/ppme.29952> (date of access: 22.05.2025).
10. Mathematical models for the analysis of the parameters of channels in the planning of mechanical processing and welding operations. Theoretical and applied problems, november 22–24, 2023, : Proceedings ITTAP'2023: 3rd International Workshop on Information Technologies, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland, 22–24 November 2023. 2023. P. 165–182.
11. Гагалюк А.В., Паливода Ю.Є. Процеси виготовлення машин. Частина 1: технологічні основи машинобудування : навчальний посібник Тернопіль: Осадца Ю. В., 2025. – 308 с.
12. Паливода Ю. Є. Інструментальні матеріали, режими різання, технічне нормування механічної обробки : навчально-методичний посібник / Паливода Ю.Є., Дячун А.Є., Лещук Р.Я. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 240 с.
13. TaeguTec. Сплав ТТ9080. URL: <https://www.imc-companies.com/TaeguTec/ttkCatalog/Grade.aspx?grade=ТТ9080&item=4207959&fnum=1506&map=DR&app=77>
14. Sandvik Coromant. Технологія обробки металів різанням. URL: https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2022/02/C-2920-40_compressed.pdf
15. Sandvik Coromant. Фрезерування. Посібник. https://polidecktech.com/wp-content/uploads/2021/12/MTG_D-ФРЕЗЕРОВАНИЕ.pdf
16. New technology for the manufacturing and use of rolling kingpin bushings in the

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						50
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

undercarriage of certain vehicles. Senyk A., Kobelnyk V., Gagaliuk A., Plavutska I., Matviyishyn A., Larochkin A., Dubyniak T. Procedia Structural Integrity. 7th International Conference on In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction, DMDP 2023 Ternopil 18 October 2023 до 20 October 2023. 2024. Vol. 59, P. 508-515. <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85195796663&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&nlo=&nlr=&nls=&sid=a84d4364e9e8a8c805127dd9219dd36e&sot=aff&sdt=a&sl=67&s=AF-ID%28%22Ternopil+Ivan+Puluj+National+Technical+University%22+60013556%29&relpos=21&citeCnt=0&searchTerm=>

17. Probability-statistical estimation method of feed influence on the tangential cutting force under turning / V. Krupa et al. Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. 2022. Vol. 114, no. 1. P. 22–31. URL: <https://doi.org/10.5604/01.3001.0016.1480>

18. Technological Heredity and Accuracy of the Cross-Section Shapes of the Hydro-Cylinder Cylindrical Surfaces / P. D. Kryvyi et al. ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference, Detroit, Michigan, USA, 9–13 June 2014. 2014. URL: <https://doi.org/10.1115/msec2014-3946> (date of access: 22.05.2025).

19. V. Krupa, N. Tymoshenko, V. Kobelnyk, I. Petrechko, Probability-statistical estimation method of feed influence on the tangential cutting force under turning, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering 114/1 (2022) 22-31.

20. Volodymyr Shanaida, Ruslan Skliarov, Valeriy Lazaryuk. Mathematical models for the analysis of the parameters of channels in the planning of mechanical processing and welding operations/ Proceedings ITTAP'2023: 3rd International Workshop on Information Technologies: Theoretical and Applied Problems, November 22–24, 2023, Ternopil, Ukraine, Opole, Poland. 2023, 3628, pp. 43-54. (Scopus) <https://ceur-ws.org/Vol-3628/paper12.pdf>

21. Бабій А.В., Довбуш Т.А., Бабій М.В., Ткаченко О.І., Сташків М.Я. Динаміка

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						51
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

машин. Навчальний посібник для студентів денної та заочної форм навчання спеціальностей 133 «Галузеве машинобудування» та 208 «Агроінженерія» для здобуття освітнього ступеня «Магістр». Тернопіль : ТНТУ 2023. 246 с.

22. Безпека життєдіяльності та основи охорони праці: Навчально-методичний комплекс для підготовки спеціалістів ступеня «бакалавр» III-IV рівнів акредитації для всіх напрямків підготовки / М.М.Сақун, І.В.Москалюк, В.Ф.Нагорнюк; за редакцією Сақуна М.М. – Одеса: Видавництво, 2017. – 400 с.
23. Використання методу ітерацій для дослідження точності подач металорізальних верстатів / Кобельник В.Р, Крупа В.В., Тимошенко Н.М. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: тези допов. – Краматорськ: ДДМА, 2018. С. 78-80.
24. Вплив випадковості подачі на висоту мікронерівностей поверхні при її точінні або розточуванні / П. Кривий, Н. Тимошенко, М. Шарик, В. Крупа Львів : Машинознавство. 2013. №9-10 (195-196). С. 76-83.
25. В'юк Д. В., Крупа В. В. Ймовірно статистична модель оцінювання ефективності застосування твердосплавних пластинок в умовах дрібносерійного виробництва. Актуальні задачі сучасних технологій : Матеріали XII Міжнар. науково-практ. конф. молодих уч. та студентів, м. Тернопіль, 6–7 груд. 2023 р. Тернопіль, 2023. С. 87–88.
26. Гагалюк А. В., Складов Р. А. Генетичні алгоритми в генеративному дизайні. Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій : матеріали Міжнародної науково-технічної конференції до 60-річчя з дня заснування Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та 175-річчя з дня народження Івана Пулюя, (Тернопіль, 14–15 травня 2020 року), – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2020. – 288 с. - С. 56-57
27. Довбуш Т.А. Опір матеріалів: навч. посіб. до виконання розрахунково-графічних робіт і самостійної роботи /Довбуш Т.А., Хомик Н.І., Бабій А.В., Цьонь Г.Б., Довбуш А.Д. Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2022. 220 с.
28. Дослідження розсіювання величин подач токарних верстатів в імовірнісному

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		52

аспекті / В. В. Крупа та ін. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 4(83). С. 16–28. URL: <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2022.4.2>

29. Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Сторожук В.М. Практикум із охорони праці: навчальний посібник. Львів: Афіша, 2000. 352 с.
30. Кобельник В.Р. Ефективність керованого процесу свердління наскрізних отворів шляхом забезпечення зміни подачі / В.Р. Кобельник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2012. – Вип. № 31. – С. 47–56.
31. Кобельник В.Р. Жорсткість вертикально-свердлильних верстатів / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2007. – Вип. № 1 (40). С. 34–40.
32. Кобельник В.Р. Методика дослідження кінематичної точності механізму подач вертикально-свердлильних верстатів на прикладі верстата моделі 2Н118 / В.Р. Кобельник, П.Д. Кривий // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – Вип. 8. – С. 99–108.
33. Кобельник В.Р. Підвищення ефективності процесу свердління наскрізних отворів регулюванням подачі: дис. канд. техн. наук: 05.03.01: / Кобельник Володимир Романович; Терноп. нац. техн. ун-т ім. Івана Пулюя. - Т., 2013. - 21 с.
34. Ковбашин В. І., Пік А. І. Інженерна графіка : навч. посіб. м. Тернопіль : Підруч. і посіб., 2023. 240 с.
35. Кривий П. Д. , Крупа В. В. Конструкторсько-технологічні параметри багаторізцевих розточних головок з радіусними вершинами різців. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2011. Вип. 33 С. 92-99.
36. Кривий П. Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищеної якості згортних втулок : монографія / Кривий П. Д., Сенік А. А. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2019. – 232 с. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/27951>
37. Кривий П. Д., Крупа В. В. Геометричні та математичні моделі формування шорсткості циліндричних поверхонь при точінні та розточуванні. Вісник

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- ЖДТУ. Серія "Технічні науки". 2011. Т. 1, № 2(53). С. 44–55. URL: <http://vtn.ztu.edu.ua/article/view/70846>.
- 38.Кривий П. Д., Крупа В. В. Інструментальне забезпечення процесу комбінованого розточування глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ЖДТУ. Серія: Технічні науки. 2012. № 2. С. 23–34.
- 39.Кривий П., Крупа В., Продан В. Конструкторсько-технологічні передумови підвищення якості оброблення глибоких отворів тонкостінних циліндрів. Вісник ТДТУ. 2010. Т. 15, № 1. С. 147–156. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/486>.
- 40.Кривий П.Д. Вплив головного заднього кута спірального свердла на осьове зусилля і крутний момент при свердлінні // П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник / Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ – Київ, 2006. – Вип. № 19. – С. 58–64.
- 41.Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення зменшення задирок при наскрізному свердлінні / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник // Всеукраїнська молодіжна конференція «Машинобудування України очима молодих : прогресивні ідеї – наука – виробництво, 22 – 25 жовтня 2012 р. : тези допов. – К. : КПІ, 2012. – Том 1. – С. 71–73.
- 42.Кривий П.Д. Конструкторсько-технологічне забезпечення процесу свердління наскрізних отворів / П.Д. Кривий, В.Р. Кобельник // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. – Краматорськ, 2011. – Вип. № 28. – С. 77–85.
- 43.Крупа В. В. Визначення конструкторсько-технологічних параметрів багаторізцевих розточних головок з поділом припуску та подачі. Вісник ТДТУ. 2011. Т. 16, № 1. С. 105–117. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/959>.
- 44.Крупа В. В. Металорізальні інструменти з асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких отворів циліндрів: дис. канд. техн. наук : 05.03.01. Тернопіль, 2015. 168 с. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/5656>
- 45.Крупа В., Кобельник В., Гагалюк А. Обґрунтування параметрів спеціального трикулачкового патрона для затиску тонкостінних циліндричних заготовок.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University. 2023. № 4. С. 128–137. URL: <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.4.16>

46. Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А. Прогнозування розвитку технічних систем: навч. посібник / Ю. М. Кузнецов, Р. А. Скляр; під ред. Ю. М. Кузнецова. – Київ : ТОВ «ЗМОК» – ПП «ГНОЗІС», 2004. – 323 с.
47. Кузнецов Ю. М., Скляр Р. А. Формалізований опис шпиндельного вузла як основної компоненти багатошпиндельного токарного автомата. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : зб. наук. праць. - Краматорськ : ДДМА, 2009. - Вип. 25. – С. 139-146
48. Кухарський О.М., Кузьмін М.І. Визначення припусків табличним методом. Тернопіль: Видавництво ТДТУ, 2004. 135 с.
49. Метод оцінювання статичної точності кінематичних ланцюгів подач консольних фрезерних верстатів / П. Д. Кривий та ін. Прогресивні технології в машинобудуванні : збірник наукових праць : Матеріали Міжнар. науково-техн. конф., м. Львів. Львів, 2020. С. 103–105.
50. Методичний посібник до курсового проекту по курсу “Технологія машинобудування” / О.М.Кухарський, І.В. Кушак. Тернопіль, 2001. 65 с.
51. Оправка фланцева кулачкова : пат. 56794 Україна : F16C 15/00. № u201008774 ; заявл. 14.07.2010 ; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2. 1 с.
52. Орищук Р. М., Чернявський І. В., Шанайда В. В. Дослідження точності позиціонування деталей різної геометричної форми у верстатних механізмах кріплення і силової фіксації. Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї–наука–виробництво : матеріали ХІХ Міжнар. науково-практ. конф., м. Суми, 25–26 листоп. 2020 р. Суми, 2020. С. 63–66.
53. Підвищення продуктивності процесу і якості плоскої поверхні сформованої комбінаційним торцевим фрезеруванням / П. Д. Кривий та ін. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : збірник наукових праць. 2020. № 3 (47). С. 199-206.
54. Розточувальні інструменти з попарно-асиметричним розміщенням лез для оброблення глибоких циліндричних отворів П. Д. Кривий, В. Р. Кобельник, В. В. Крупа, В. Г. Яковлєв. Технічні науки та технології. 2016. № 2 (4). С. 28-35.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		55

- 55.Склярів Р. А. Вибір бази порівняння при прогнозуванні стратегії підвищення якості технологічного обладнання. Матеріали наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя механіко-технологічного факультету «Прогресивні матеріали та технології в машинобудуванні, будівництві та транспорті. (м. Тернопіль, 16 травня 2011 р.), 2011.- С. 111-112
- 56.Склярів Р. А., Гагалюк А. В. Використання методу нейронних мереж для прогнозування металорізальних верстатів. Матеріали XXI наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя, 16-17 травня 2019 року. – Т. : ТНТУ, 2019. – 212 с. (Машинознавство та машинобудування). - С. 34
- 57.Склярів Р. А., Гуцалюк І. В. Вимоги до технологічного оснащення яке використовується для затиску призматичних заготовок. Актуальні задачі сучасних технологій: зб. тез доповідей міжнар. наук.-техн. конф. Молодих учених та студентів, (Тернопіль, 27–28 листоп. 2019.) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін.]. – Тернопіль: ТНТУ, 2019. – Т. 2. – 143 с. - С. 26
- 58.Склярів Р. А., Приходай Д. А. Шляхи підвищення точності обробки на металорізальних верстатах. Збірник тез доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених та студентів «Актуальні задачі сучасних технологій», Тернопіль, 2021.- С. 55-56
- 59.Склярів Р. А., Четвержук Т. І., Полінкевич Р. М., Редько Р. Г., Залета О. М. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів. Міжвузівський збірник наукових праць «Наукові нотатки» за галузями знань «Фізико-математичні науки» та «Технічні науки», Випуск 71, Луцьк, 2021, № 71. – 363 с. – С. 322-329.
- 60.Склярів Р. А., Шанайда В. В., Савчук М. А. Дослідження перехідних процесів електропривода металорізального верстата з використанням інформаційних технологій / Р. Склярів, В. Шанайда, М. Савчук // Вісник ТНТУ. – 2011. – Том 16. – № 1. – С.117-125.
- 61.Стручок В.С. Безпека в надзвичайних ситуаціях: Методичний посібник . Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. – 156 с.

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

62. Шанайда В. В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках. Тернопіль : Вид-во ТДТУ, 2001. 163 с.

63. ДСП 173-96 Державні санітарні правила планування та забудови населених пунктів. Зі змінами. Чинний з 07.03.2019. 61 с.

64. ДСТУ EN 482:2022 Повітря робочої зони. Загальні вимоги до характеристик методик вимірювання вмісту хімічних речовин (EN 482:2021, IDT). Чинний з 31.12.2023. 23 с. URL:

https://online.budstandart.com/ua/catalog/document.html?id_doc=112734

					<i>КРБ 22-029.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
						57
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

ДОДАТКИ

