

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет транспорту та механічної інженерії

(повне найменування факультету)

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

(повна найменування кафедри)

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

**Вдосконалення технології відновлення валу
компресора за допомогою методів плазмового
напилення**

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти

групи ІМм-21

Возняк Іван Олександрович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу

допущено до захисту

«__» _____ 2023 р.

к.т.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2023 року

Луцький національний технічний університет

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Р. РЕДЬКО
“ _____ ” _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА
Возняка Івана Олександровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Вдосконалення технології відновлення валу компресора за допомогою методів плазмового напилення», керівник кваліфікаційної роботи магістра Четвержук Тарас Іванович к.т.н., доц. каф. ПМіМ затвержені наказом вищого навчального закладу від «14» січня 2023 р., № 42/01-02

2. Строк подання студентом роботи 01.12.2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики, технічна документація базового технологічного процесу, паспорт токарного верстату, конструкторська документація, нормативні дані.

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

1. Провести аналіз способів відновлення колінчастих валів. 2. Вдосконалити базовий технологічний процес та розробити конструкцію установки для відновлення валів. 3. Спроекувати коробку швидкостей токарного верстату з використанням CAD/CAM/CAE систем. 4. Розробити start-up проекту з відновлення валів.

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

Установка для плазмового напилення 1л - ф.А1; Пристрій для закріплення плазматрону 1л - ф.А1, Коробка швидкостей токарного верстату 1л - ф.А1; Планування ділянки відновлення деталей 1л - ф.А1; Результати моделювання 1л - ф.А1

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

01.07.2023 р.

Керівник

_____ (підпис)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів виконання кваліфікаційної роботи магістра	Примітка
1.	<i>Сучасний стан та методи відновлення колінчастих валів компресорів</i>	<i>25.10.2023</i>	
2.	<i>Технологічний розділ</i>	<i>5.11.2023</i>	
3.	<i>Конструкторсько-дослідницький розділ</i>	<i>15.11.2023</i>	
4.	<i>Розробка start-up проекту з відновлення валів</i>	<i>25.11.2023</i>	
5.	<i>Представлення роботи до захисту</i>	<i>8.12.2023</i>	
6.	<i>Електронний варіант кваліфікаційної роботи магістра</i>		

Студент

_____ (підпис)

Возняк І.О.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Четвержук Т.І.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Возняк І.О. Вдосконалення технології відновлення валу компресора за допомогою методів плазмового напилення. – Рукопис.

Атестаційна магістерська робота на здобуття кваліфікації другого (магістерського) рівня вищої освіти із спеціальності 131 – Прикладна механіка. – Луцький національний технічний університет. – Луцьк, 2023.

Робота присвячена питанням вдосконаленням технологічного процесу відновлення колінчатого валу з розробкою відповідної установки на базі токарного верстату. Спроектований стенд призначений для відпрацювання технології плазмового напилення валів. Проведено кінематичний розрахунок коробки швидкостей токарного верстату. Здійснено розрахунок валів коробки швидкостей з використанням CAD/ CAM/ CAE систем.

Здійснено планування ділянки відновлення валів. Розроблено start-up проєкт з відновлення валів згідно проведеного ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту.

Ключові слова: відновлення, плазмове напилення, зміцнення, токарний верстат, кінематична схема, надійність, start-up проєкт.

ANNOTATION

Wozniak I.O. Improvement of the technology of restoring the bulk compressor using plasma spraying methods – Manuscript.

Attestation master's thesis for obtaining the qualification of the second (master's) level of higher education in specialty 131 – Applied mechanics. – Lutsk National Technical University.– Lutsk, 2023.

The work is devoted to the issues of improving the technological process of crankshaft restoration with the development of a corresponding installation on the basis of a lathe. The designed stand is intended for working out the technology of plasma sputtering of shafts. The kinematic calculation of the speed box of the lathe was carried out. The gearbox shafts were calculated using CAD/CAM/CAE systems. The planning of the shaft restoration site has been carried out. A start-up project for the restoration of shafts has been developed according to the conducted market analysis of project implementation possibilities.

Keywords: restoration, plasma spraying, strengthening, lathe, kinematic scheme, reliability, start-up project.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 СУЧАСНИЙ СТАН ТА МЕТОДИ ВІДНОВЛЕННЯ КОЛІНЧАСТИХ ВАЛІВ КОМПРЕСОРІВ.....	11
1.1 Опис вихідних даних валу компресорної установки.....	11
1.2 Аналіз матеріалу виробу	13
1.3 Особливості відновлення колінчастого валу компресорної установки за базовою технологією.....	14
1.4 Аналіз способів відновлення колінчастого валу.....	17
1.5 Формулювання завдань випускної кваліфікаційної роботи.....	23
2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	24
2.1 Опис установки для плазмового напилення.....	24
2.2 Вибір матеріалу для плазмового покриття.....	26
2.3 Технологічний процес плазмового нанесення покриття при відновленні колінчастого валу компресора.....	28
2.4 Планування ділянки відновлення валів.....	31
3 КОНСТРУКТОРСЬКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ.....	34
3.1 Кінематичний розрахунок коробки швидкостей верстату 1А364..	34
3.2 Побудова та аналіз структурної сітки.....	36
3.3 Побудова графіка чисел обертів.....	41
3.4 Визначення передаточних відношень.....	44
3.5 Розрахунок валів коробки швидкостей з використанням CAD/CAE систем.....	47
4 РОЗРОБКА START-UP ПРОЄКТУ З ВІДНОВЛЕННЯ ВАЛІВ.....	52
4.1 Опис ідеї проєкту.....	52
4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту.....	53
4.3 Ринковий аналіз можливостей впровадження проєкту.....	54
ВИСНОВОК.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	58

ВСТУП

Актуальність теми. Для відновлення зношених деталей машин потрібно рівень витрат на порядок менше, ніж для придбання чи виготовлення нової деталі. Це можна пояснити тим, що для відновлення необхідно відносно малі об'єми металу, що наплавляється чи наварюється. Приблизно 85 % деталей, які необхідно відновлювати, мають геометричну величину зношення, яка не перевищує 0,3 мм. Таким чином, відновлення працездатності деталі вимагає менших витрат металу та енергії, ніж виготовлення нової деталі. Виходячи з цього, промислове використання методів реновації деталей машин економічно виправдане і дозволяє досягти значного технологічного (підвищення працездатності) та економічного (зниження фінансових та трудових витрат) ефектів. Основною причиною зношування деталей апаратів різного призначення (редуктори, коробки швидкостей, двигуни автомобілів, електромеханічних установок тощо) є абразивне зношування в парах тертя, корозійно-механічне зношування та кавітаційне зношування.

Як показує багаторічна практика експлуатації та ремонту деталей машин, близько 75 % деталей, що вибраковуюються, можуть бути успішно відновлені з отриманням вихідних характеристик та властивостей. У цьому інноваційні технології реновації дозволяють як відновити властивості деталей до вихідного стану, так й істотно їх підвищити.

Колінчастий вал компресора у процесі роботи піддається значним навантаженням. Значна кількість циклів різного навантаження, контактні тиски в парах тертя визначають малий ресурс роботи валу компресорної установки. Втрати в двигуні компресора на подолання тертя в спряжених парах можуть досягати до 50% від загальних втрат у двигуні. Тому підвищення економічності роботи двигуна компресора може бути досягнуто при підвищенні антифрикційних властивостей контактуючих деталей, їх зносостійкості та захисту від корозії.

Одним з перспективних способів відновлення деталей машин є лазерне нанесення покриття та зміцнення. Цей спосіб дозволяє отримувати поверхневий шар з високою якістю та експлуатаційними властивостями. Однак лазерні технології не знаходять широкого застосування через низький коефіцієнт корисної дії процесу. Перспективним також вважається відновлення деталей машин із застосуванням плазмових технологій, які дозволяють використовувати порошкові зносостійкі сплави, що суттєво підвищує термін експлуатації деталей машин.

Плазмове напилення має високу універсальність, при цьому різні поєднання наплавних порошків дозволяють отримувати наплавлені поверхні з різними властивостями. При цьому способі відновлення деталей машин досягається мінімальний вплив на основний метал деталі, що дозволяє зберегти та навіть підвищити її працездатність. На підставі вищевикладеного можна визнати актуальною тематику даної роботи.

Завданням кваліфікаційної роботи було вдосконалити технологію плазмового напилення для відновлення валу компресора та спроектувати відповідне технологічне обладнання.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення продуктивності та якості відновлення колінчастого валу компресора.

Для досягнення мети поставлено наступні *задачі*:

1. Підвищити ефективність плазмового напилення стосовно проаналізованої деталі;
2. Розробити проектну технологію плазмового напилення;
3. Сконструювати обладнання для реалізації запропонованої технології;
4. Дослідити та вибрати кращий наплавний матеріал та параметри режиму плазмового напилення.
5. Розробити start-up проєкт з відновлення валів з можливістю реального впровадження.

Об'єкт дослідження. Процеси та технології плазмового напилення.

Предмет дослідження. Відновлення валу компресора за допомогою плазмового напилення з вдосконалення технологічного процесу та обладнання.

Методи дослідження. Системний аналіз, емпіричний аналіз і синтез, розрахунок і проектування металорізальних верстатів, математичне та комп'ютерне моделювання, CAD-CAM-CAE технології, методика експериментальних досліджень, технічне прогнозування, SWOT-аналіз.

Наукова новизна:

- вдосконалено технологічний процес відновлення колінчатого валу з методом плазмового напилення;
- спроектовано спеціальну установку для напилення валів на базі токарного верстату із застосуванням плазмотрону;
- досліджено та запропоновано наплавний матеріал та параметри режиму плазмового напилення валу;
- спроектовано коробку швидкостей токарного верстату із використанням CAD-CAM-CAE систем.
- розроблено планування ділянки для відновлення валів;
- розроблено start-up проєкт з відновлення валів з на основі проведеного аналізу можливостей впровадження проєкту.

Особистий внесок здобувача. Основні результати, які розкривають в повній мірі суть магістерської роботи, рекомендації та висновки належать автору. Самостійно поставлено мету і визначено задачі досліджень, проведено увесь комплекс технологічних та конструкторських рішень.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи доповідалися і обговорювалися на наукових семінарах кафедри прикладної механіки та мехатроніки ЛНТУ та на III студентській науково-технічній конференції «Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії» факультету транспорту та механічної інженерії. м. Луцьк, 16 листопада 2023 року.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота магістра складається із

вступу, 4 розділів, висновків та списку використаних джерел. Зміст роботи викладено на 58 сторінках друкованого тексту формату А4, ілюструється 24 рисунками та 7 таблицями. Список використаних літературних джерел складається з 18 найменувань.

Корінні шийки валу слугують для встановлення валу та його обертання на опорних (корінних) підшипниках. З'єднання валу з головками шатунів – шарнірне, реалізується за допомогою шатунних шийок. За допомогою щічок відбувається фіксація шатунних та корінних шийок відносно один одного. Коліно валу являє собою конструкцію з шатунної шийки, двох щічок та корінних шийок, які примикають до них. Задня частина валу закінчується хвостовиком із фланцем, на якому виконується кріплення маховика.

У процесі роботи колінчастий вал компресора піддається значним навантаженням, серед яких слід виділити механічне зношування, згин та кручення. На колінчастий вал діють сили від рухомих мас і тиску газів. Під час запуску двигуна компресора порушується нормальна робота опорних підшипників, що викликає інтенсивне зношування шийок валу та вкладишів. Також слід зазначити наявність корозійного впливу на шийки колінчастого валу. Оскільки колінчастий вал працює у складних умовах, відбувається інтенсивне його зношування. Серед найпоширеніших несправностей колінчастих валів слід зазначити: деформація валу внаслідок його перегріву та зношення опорних шийок. Крім цього, вали, що надходять у ремонт, мають зношення фланцевих отворів під кріплення маховика і зношення різі під храповик.

У числі дефектів колінчастого валу, що виявляються в процесі його тривалої роботи, слід відзначити [2, 3]:

- зношення отвору під підшипник;
- збільшення довжини передньої корінної шийки;
- Збільшення довжини шатунних шийок;
- вироблення шпонкової канавки по ширині;
- зношення шийки під шестірню і демпфер шківів;
- зношення зовнішньої поверхні фланця;
- згин валу;
- зношення корінних та шатунних шийок;

- зношення канавок для мащення;
- биття торцевої поверхні фланця;
- зношення отворів під болти кріплення маховика.

Незначний робочий ресурс колінчастого валу компресорної установки пояснюється параметрами діючих навантажень – значним числом циклом знакозмінних навантажень і високим контактним тиском у місці з'єднання «вкладиш-шийка». В результаті інтенсивного зношування відбувається зменшення діаметру корінних та шатунних шийок від номінального розміру. При зміні геометрії валу відбувається порушення режиму змащування валу, виникає так зване сухе тертя, тому відбувається перегрів та «прилипання» вкладишів.

Тому зношування валу викликає його вихід з ладу при не повністю використаному запасі міцності. Залишковий запас міцності валу, що вийшов з ладу, може становити до 70 % від нового валу, але при цьому необхідність його заміни продиктована зношенням, що становить десяті долі міліметра [3, 9].

1.2 Аналіз матеріалу виробу

Вал компресорної станції виконаний із сталі 45. Сталь 45 відноситься до конструкційної вуглецевої якісної сталі [2]. Механічні властивості сталі 45 та її хімічний склад представлені в таблиці 1.1 та таблиці 1.2, вони обумовлюють застосування сталі 45 для виготовлення деталей машин, що піддаються значним навантаженням в умовах тертя кочення та ковзання.

Таблиця 1.1 – Вміст та співвідношення хімічних елементів у сталі 45

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As
0,40 - 0,50	0,15 - 0,35	0,5 - 0,8	до 0,25	до 0,05	до 0,035	до 0,25	до 0,25	до 0,08

Таблиця 1.2 – Механічні властивості сталі 45

Сталь	Межа текучості, МПа	Часовий Опір розриву, МПа	Відносне		Ударна в'язкість, кДж/м ²
			Видовження, %	Звуження, %	
45	355	435	17,0	35,0	340

Високий рівень механічних властивостей, у тому числі і підвищена зносостійкість порівняно з низьковуглецевими сталями сталі 45 досягається за рахунок підвищеного вмісту вуглецю. Це в свою чергу призводить до ряду труднощів при зварюванні сталі 45 і наплавлення деталі з цієї марки сталі [8].

По-перше, слід зазначити схильність до появи холодних тріщин у навколошовній зоні. По-друге, у металі зварного шва висока ймовірність появи гарячих (кристалізаційних) тріщин. По-третє, при зварюванні виробів із сталі 45 через структурні зміни практично неможливо досягнути рівномірності металу зварного шва та основного металу.

1.3 Особливості відновлення колінчастого валу компресорної установки за базовою технологією

З використанням внутрішньо цехового транспорту деталі надходять на ділянку відновлення, де відбувається їхнє складування на стелажі. Першою операцією технологічного процесу відновлення є операція очищення – миття. Очищення від забруднень є однією з основних операцій при відновленні деталей машин, тому що від правильності її проведення залежить якість всього ремонту, загальний рівень якості виробничих процесів на будь-якому сучасному підприємстві.

Миття проходить із застосуванням спеціального обладнання – машини ТЕКНОХ LAVAPEN 4/60, яка представлена на рисунку 2.1. Перший етап операції

миття проходить в лужному розчині з температурою 80 – 90 °С при частоті коливання 20 – 25 кГц. Тривалість миття 30 – 40 хвилин. Після миття в лужному розчині виконують промивання деталі проточною водою протягом 10 – 15 хвилин. Температура води 20 – 30 °С.



Рисунок 1.2 – Машина для миття TEKNOX LAVAPEN 4/60

Друга операція – видалення (випалення) мастила в масляних каналах. Для виконання цієї операції вал поміщають в електропіч та нагрівають до температури 400 °С. Тривалість випалювання становить 20 хвилин. Третя операція – дефектування. Деталі після миття надходять на стіл дефектувальника, де виконується їхня перевірка на наявність неприпустимих дефектів та вимірюється величина зношування. Для виконання цієї операції застосовується мікрометр MS-111 і базова призма.

Четверта операція – прочищення масляних каналів та зенкування отворів (їх слід закрити захисними пробками з азбесту).

П'ята операція – відновлювальне наплавлення. Вал закріплюють у кулачках токарного верстата. Після цього виконують наплавлення порошковим

самозахисним спеціальних дротом. Застосовується дріт ПП-Нп-60Х5Г2СМ.

Параметри режиму наплавлення:

- струм зварювання – 140...170 А;
- напруга на дузі – 22 ... 24 В;
- швидкість подачі дроту – 1,5 ... 1,8 м / хв,
- швидкість наплавлення - 10 ... 12 м / год.

Наплавлення проводять на постійному струмі зворотної полярності. Як джерело живлення застосовується зварювальний випрямляч ВС-500, представлений малюнку 1.3а, і механізм подачі ПДПГ-500, представлений малюнку 1.3б.



а)



б)

Рисунок 1.3 – Обладнання для наплавлення:

зварювальний випрямляч ВС-500(а) та напівавтомат ПДПГ-500(б)

Шоста операція – механічне оброблення. Після охолодження валу видаляють з нього азбестові пробки та встановлюють вал на токарний верстат. Виконують шліфування шийок на таких параметрах режиму:

- швидкість обертання валу – 0,2...0,3 м/сек;

швидкість обертання шліфувального круга – 25...30 м/сек;

глибина шліфування – 0,005 мм;

поздовжня подача – 3...8 мм/ об;

витрату охолоджуючої рідини – 0,3 л/хв.

Сьома операція – зенкування отворів. Восьма операція – контроль якості наплавлення. Виконується виявлення деталей з неприпустимими дефектами: відшаруваннями, тріщинами, ненаплавленими ділянками. Виконується із застосуванням лупи з 4-кратним збільшенням та індикатора годинникового типу ІЧ02.

1.4 Аналіз способів відновлення колінчастого валу

Значення коефіцієнтів зносостійкості, витривалості і зчеплюваності, які характеризують поширені способи відновлення деталей машин [9, 11], представлені в таблиці 1.3, дозволяють рекомендувати для відновлення заданої деталі такі способи, як: вібродугове наплавлення; наплавлення у середовищі вуглекислого газу; газополум'яне напилення; плазмове напилення; плазмове наплавлення.

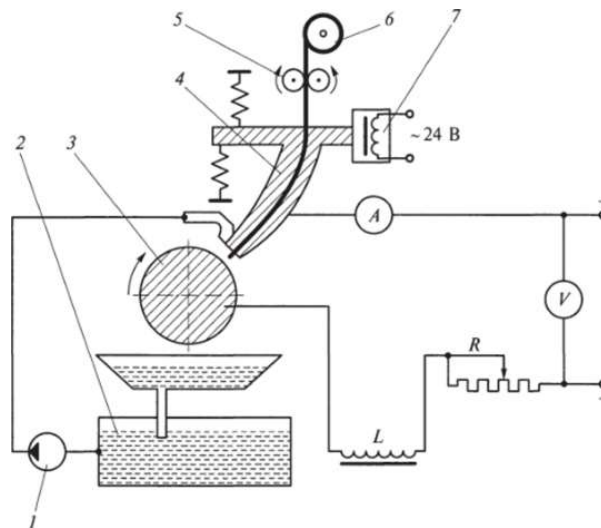
Таблиця 1.3 – Характеристики різних способів відновлення деталей машин

Способи відновлення	Значення коефіцієнтів		
	Коефіцієнт зносостійкості	Коефіцієнт витривалості	Коефіцієнт зчеплюваності
Механічне оброблення під ремонтний розмір	1,0	1,0	1,0
Ручне дугове наплавлення	0,9	0,8	1,0
Наплавлення у вуглекислому газі	0,85	0,9...1,0	1,0
Вібродугове наплавлення	0,85	0,62	1,0
Контактне наплавлення (приварювання мет. шару)	0,9...1,1	0,8	0,8...0,9
Газополум'яне напилення	1,0...1,3	0,6...1,1	0,3...0,4

Продовження табл. 1.3

Плазмове напилення	1,0...1,5	0,7...1,3	0,4...0,5
Наплавлення під шаром флюсу	0,90	0,82	1,0
Дугова металізація	1,0...1,3	0,6...1,1	0,2...0,3
Хромування (електролітичне)	1,0...1,3	0,7...1,3	0,4...0,5
Металізація(електролітична)	0,9...1,2	0,8	0,65...0,8
Клеєві композиції	1,00	–	0,7
Електромеханічна обробка (висаджування та вигладжування)	до 3,00	0,8	1,0
Встановлення додаткової деталі	1,0	0,8	1,0
Пластичне деформування	0,8...1,0	1,0	1,0

Виконання вібродугового наплавлення за схемою згідно з рисунком 1.4 передбачає застосування віброуючого електрода, діаметр якого становить від 1,5 до 2 мм.

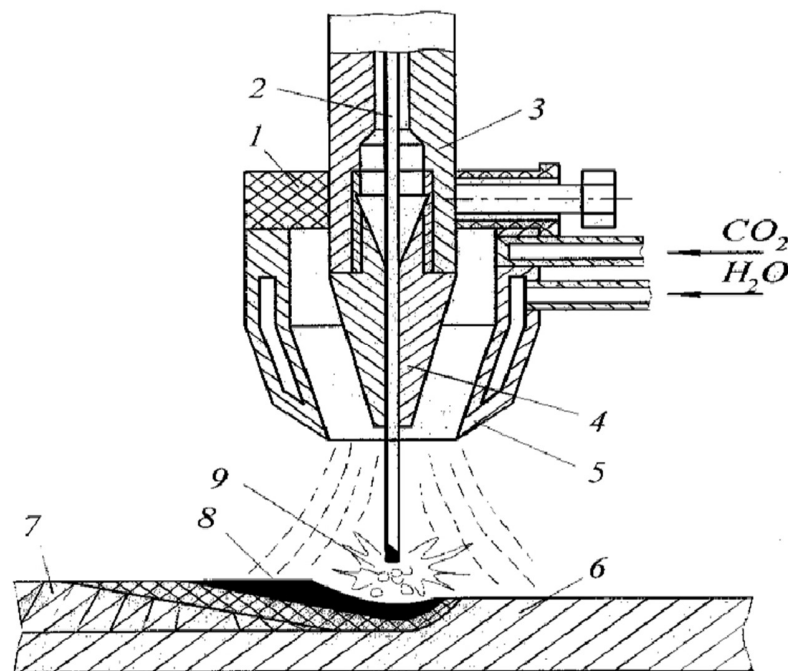


1 – насос; 2 – бак; 3 – деталь; 4 – мундштук; 5 – механізм подачі; 6 – касета; 7 – вібробудувач; А – амперметр; V – вольтметр; R – реостат; L – дросель замикання електрода та деталі

Рисунок 1.4 – Схема вібродугового наплавлення

Недоліком вібродугового наплавлення є висока ймовірність отримання наплавленого шару з порами та неоднорідною структурою. У наплавленому шарі присутні значні залишкові напруження, які призводять до зниження міцності на 30...40 %. Оскільки в процесі роботи колінчатий вал сприймає значні динамічні навантаження, то застосування вібродугового наплавлення до цих виробів вимагатиме підвищеної уваги для забезпечення якості наплавленого шару.

Застосування наплавлення у захисних газах згідно зі схемою (рисунок 1.5) дозволяє виключити труднощі з подачею флюсу та видаленням шлакової кірки. Цей спосіб вважається найбільш технологічним та універсальним способом, який дозволяє проводити наплавлення більшості матеріалів у різних просторових положеннях.



1 – мундштук; 2 – електродний дріт; 3 – мундштук; 4 – наконечник; 5 – сопло; 6 – деталь;
7 – наплавлений шар; 8 – зварювальна ванна рідкого металу; 9 – електрична дуга.

Рисунок 1.5 – Схема наплавлення у захисних газах

Застосований для захисту зварювальної ванни і наплавлюваного металу вуглекислий газ має відносно малу вартість і широку доступність. Зазвичай для такого наплавлення застосовується постійний струм. зворотної полярності. При використанні в якості захисного газу вуглекислоти відбувається окислення розплавленого металу, тому в дріт для наплавлення необхідно вводити розкислювачі (кремній і марганець).

Застосування форсованих режимів при наплавленні у вуглекислому газі обмежується недостатньою ефективністю технологічного управління процесом плавлення та перенесення електродного металу, що відрізняється низькою стабільністю. Також при наплавленні у вуглекислому газі спостерігається інтенсивне розбризкування, яке погіршує умови праці зварювальника, зовнішній вигляд та якість наплавленого шару, збільшує витрату дорогих наплавних матеріалів.

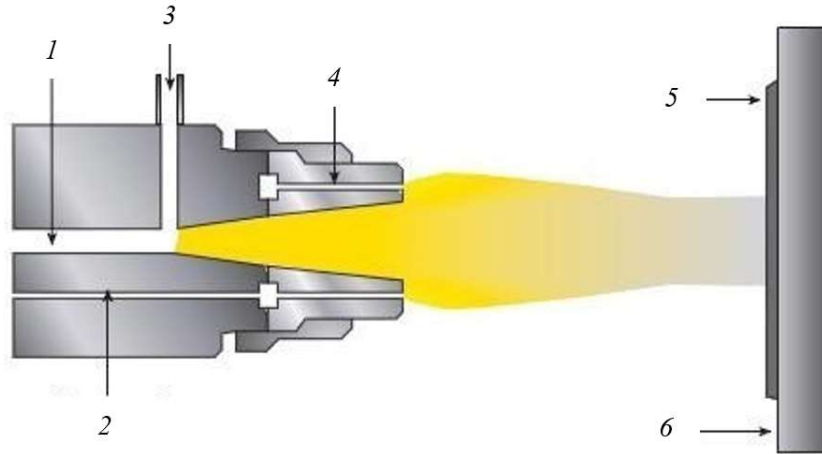
Дослідження в області підвищення ефективності наплавлення в захисних газах ведуться в напрямку розробки комп'ютерних електроприводів подачі наплавкового дроту. Другим напрямком дослідження є управління горінням дуги і переносом електродного металу [5]. Як третій напрям можна виділити розробку нових наплавочних матеріалів [11].

При відновленні валів значне поширення отримали газополум'яні способи нанесення покриттів, виконані за схемою на рисунку 1.6. Перевагами газополум'яного напилення можна зазначити [17], [18]:

- високу продуктивність;
- відносно малий теплове вплив на деталь;
- підвищену зносостійкість нанесеного покриття;
- відносну простоту даного способу.

Існуючим недоліком газополум'яного напилення є низька міцність скріплення покриття з основою. В результаті істотно знижується ресурс експлуатації відновлених виробів, якщо вони працюють в умовах ударних

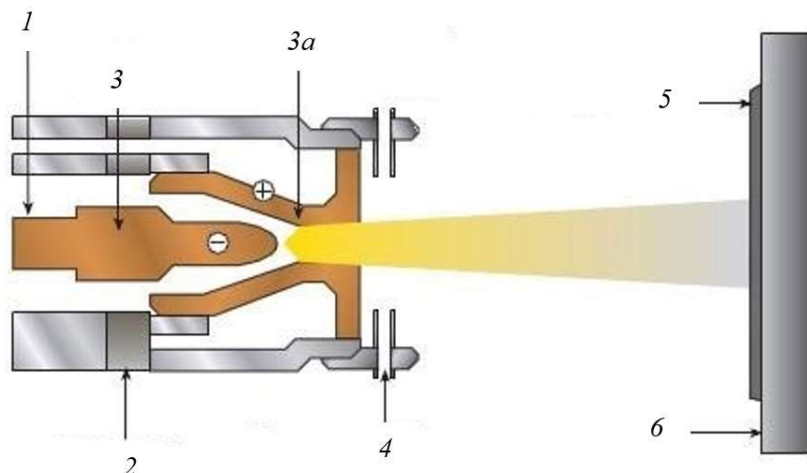
навантажень. При цьому адгезійна міцність покриття з основою ще більше знижується при збільшенні товщини наплавленого шару більше 1 мм.



1 – палаючий газ; 2 – кисень; 3 – порошок; ; 4 – сопло; 5 – покриття; 6 – деталь;

Рисунок 1.6 – Схема газополум'яного напилення

При плазмовому напиленні, схема якого представлена на рисунку 1.7, обробка деталей проходить при істотно більших концентраціях теплового потоку і швидкості перебігу струменя.



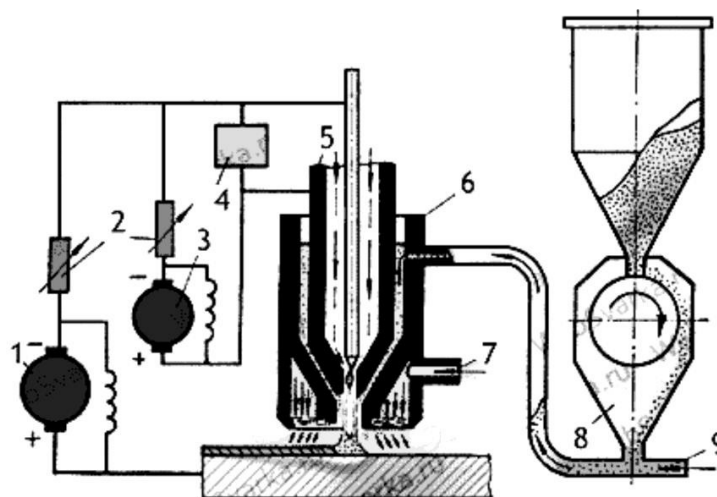
1 – плазмовий газ + струм; 2 – ізолятор; 3 – катод; 3а – анод, охолоджений водою 4 – порошок;
5 – покриття; 6 – деталь;

Рисунок 1.7 – Схема виконання газоплазмового напилення

Покриття, яке наноситься може бути на основі тугоплавких металів (тантал, молібден, вольфрам), силіцидів (MoSi_2), боридів (ZnB_2 , HfB_2), оксидів металу (Al_2O_3 , MgO , ZrO_2), карбідів (B_4C , SiC).

При проходженні через плазмовий струмінь частинок порошку присадки з розмірами 40 – 70 мкм відбувається нагрівання частинок порошку та їх перехід у пластичний стан (без розплавлення). Висока швидкість плазмового струменя надає частинкам порошку істотну кінетичну енергію, яка при зіткненні з поверхнею виробу, який наплавляється, призводить до розплющування частинок порошку і їх проникненню в нерівності поверхні. При цьому забезпечується міцне зчеплення частинок порошку з поверхнею деталі та один з одним. Плазмове наплавлення виконується дугою непрямої дії, яка горить між мідним водоохолоджуваним соплом і вольфрамовим водоохолоджуваним катодом.

Аналіз технологічності різних способів наплавлення деталей машин показує, що плазмове наплавлення, схема якої представлена на рисунку 1.8, має більшу ефективність порівняно з наплавленням у вуглекислому газі і ручним дуговим наплавленням.



1 – джерело живлення дуги прямої дії; 2 – баластові опори; 3 – джерело живлення дуги непрямої дії; 4 – осцилятор 5 – сопло для плазмоутворюючого газу; 6 – корпус пальника; 7 – отвір для введення захисного газу; 8 – живильник для подачі порошку; 9 – трубка, якою подається газ, несучий порошок

Рисунок 1.8 – Схема установки для плазмового наплавлення

Цей спосіб відновлення має великий коефіцієнт довговічності та мінімальну вартість нанесення покриттів. Плазмове наплавлення із внесенням порошку в плазмовий струмінь характеризується значною продуктивністю наплавлення, яка може досягати 6 кг/годину. Також застосування плазмового наплавлення дозволяє суттєво знизити споживання наплавного порошку в порівнянні з іншими способами відновлення деталей машин. Крім того, при плазмовому наплавленні крім дорогих порошоків на основі нікелю і кобальту можуть застосовуватися суттєво дешевші порошки на основі заліза.

1.5 Формулювання завдань випускної кваліфікаційної роботи

Аналіз можливих способів відновлення колінчастого валу компресорного агрегату виконаний з розглядом таких способів, як вібродугове наплавлення, наплавлення у вуглекислому газі, газополум'яне напилення, плазмове напилення, плазмове наплавлення. Як спосіб для побудови проектної технології обрано плазмове напилення.

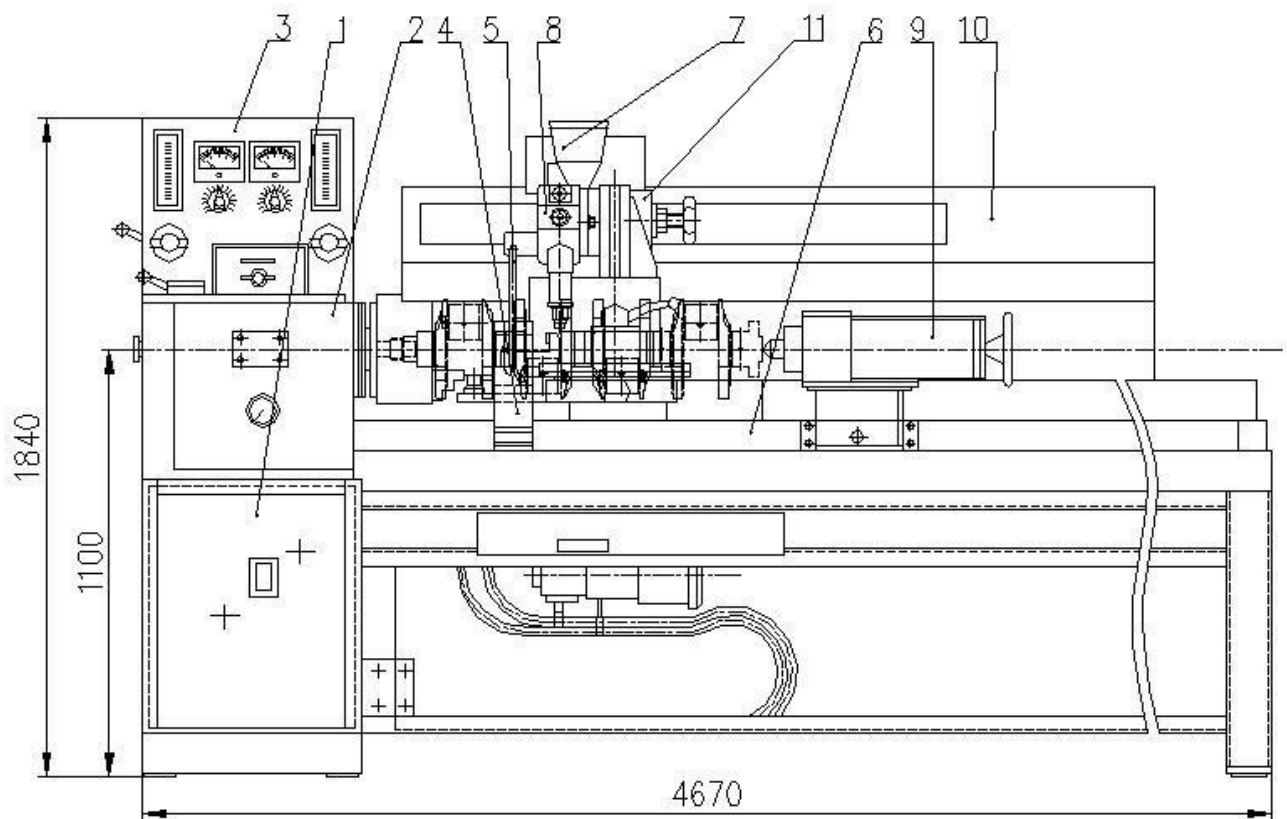
Цей спосіб відновлення володіє великим коефіцієнтом довговічності та мінімальною вартістю нанесення покриттів. На підставі вищевикладеного можна сформулювати задачі випускної кваліфікаційної роботи, послідовне вирішення яких дозволить досягти поставленої мети – підвищення продуктивності та якості відновлення колінчастого валу компресора.

1. Підвищити ефективність плазмового напилення стосовно проаналізованої деталі;
2. Розробити проектну технологію плазмового напилення;
3. Сконструювати обладнання для реалізації запропонованої технології;
4. Дослідити та вибрати кращий наплавний матеріал та параметри режиму плазмового напилення.

2 ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1 Опис установки для плазмового напилення

Установка для плазмового нанесення покриття включає наступні елементи згідно зі схемою на рисунку 2.1. Компонування обладнання виконаємо на базі токарного верстата 1А364, який вже є у виробництві та не задіяний в інших технологічних процесах. Це дозволяє заощадити капітальні витрати та технологічне обладнання при впровадженні проєктної технології відновлення валу.

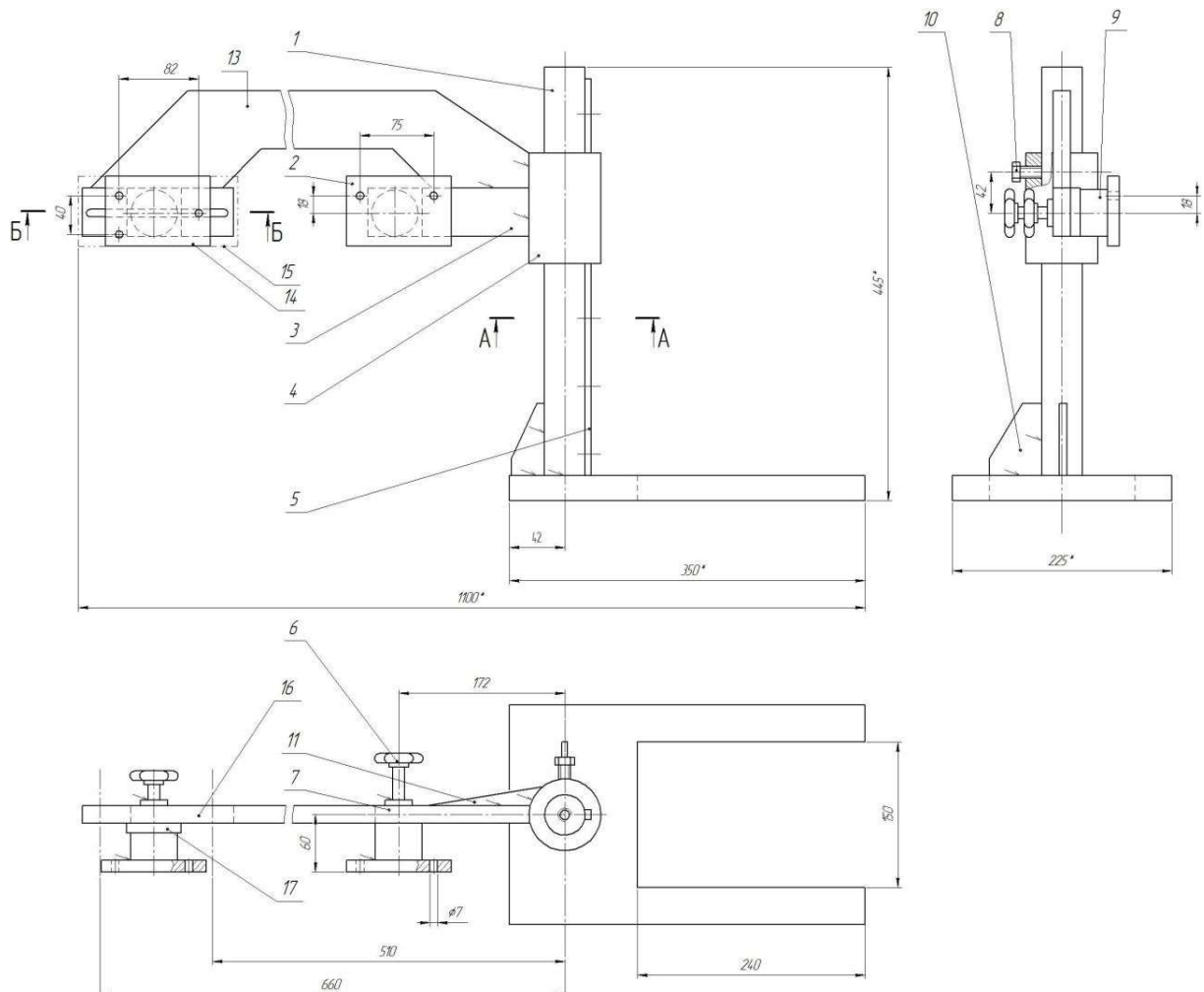


1 – станина, 2 – шпindelь, 3 – пульт управління, 4 – супорт, 5 – зварювальний пістолет, напрямні супорта, 6 – бункер для порошку, 7 – привід, 8 – задня бабка, 9 – захисний екран, 10 – пристрій спеціальний установчий.

Рисунок 2.1 – Установка для плазмового напилення

У процесі відновлення буде використаний токарний верстат 1А364, що дозволить отримати економію капітальних витрат у процесі впровадження проектної технології у виробництво, скорочення площі ділянки та підвищення коефіцієнта завантаження обладнання.

Також з метою економії коштів при впровадженні проектної технології та підвищення коефіцієнту завантаження обладнання запропоновано «не купувати окремий маніпулятор, а використовувати для обертання в процесі металізації токарний верстат 1А364. Для закріплення в супорті верстата плазматрона розроблено спеціальне оснащення, показане на рисунку 2.2.



- 1 – стійка; 2 – фланець; 3 – планка; 4 – муфта; 5 – напрямна; 6 – гвинт регулювальний;
 7 – шайба; 8 – втулка; 9 – втулка; 10 – підсилювач; 11 – коромисло; 12 – фланець;
 13 – напрямна; 14 – прокладання; 15 – штифт

Рисунок 2.2 – Пристрій для кріплення плазматрону

Пристрій являє собою П-подібну пластину, яка закріплюється в супорті. До поперечки пластини закріплена стійка 1, на якій рухомо закріплена муфта 4 з ходовим гвинтом. До муфти кріпиться планка 3, до якої двома гвинтами кріпиться плазматрон [12].

2.2 Вибір матеріалу для плазмового покриття

Як присадковий порошок може бути використаний порошок міді (ПМС-В або ПМС-Ву), застосування якого дозволяє отримувати покриття з хорошими антифрикційними властивостями. Також слід зазначити низьку вартість цього порошку наплавлення. У числі недоліків застосування мідних порошоків слід зазначити, що одержуване покриття має малу міцність, жароміцність і жаростійкість.

Можливе застосування порошку молібдену (ПНЕ-1 або ПНЕ-2), яке дозволяє отримувати наплавлений шар з високою міцністю та твердістю, що добре протистоїть абразивному зношуванню. До недоліків застосування молібденового порошку слід відзначити збільшену витрату порошку та його високу вартість.

Також при плазмовому нанесенні покриттів може бути використаний порошок нікелю (ПНК2К8 та ПНК2К9). Ці порошки дозволяють отримувати хорошу адгезію покриття до основи. Можливе застосування порошку титану (ПТС), який дозволяє отримувати наплавлений шар із високою міцністю та пластичністю. Однак шар, що наноситься із застосуванням порошку, має високу схильність до відшаровування.

Застосування порошку хрому (ПХ1 або ПХ2) дозволяє отримувати покриття з високою твердістю та міцністю. Однак такі покриття погано витримують ударні навантаження та відрізняються підвищеною схильністю до відшаровування через значну різницю в коефіцієнтах термічного розширення покриття та основного металу.

Як порошок для плазмового нанесення покриття може бути використаний також порошок ніхрому (ПХ20Н80), що дозволяє отримувати покриття з високою міцністю і твердістю. Недоліком застосування порошку ніхрому є низька пластичність покриття, слабка адгезія до основи, підвищена схильність до відшаровування.

При застосуванні порошоків, які самофлюсуються системи Ni-Cr-B-Si (ПГ-СР2, ПГ-СР3, ПГ-СР4, СНД-50, СНД-55, СНД-60, ПН70Х17С4Р4, Х17СР1) виходить покриття з хорошою адгезією, високою міцністю опором ударним навантаженням. Також слід відзначити хороше зчеплення шарів покриття один з одним та мале теплове вплив на деталь. Також покриття має гарний опір зношенню. Головним недоліком сплавів, які самофлюсуються системи Ni-Cr-B-Si є їх висока вартість. Також слід відзначити значну схильність до відшаровування від деталі.

Як порошок може бути застосований сплав нікель-алюміній (ПН70Ю30 та ПН85Ю15), що дозволяє отримувати покриття з хорошими антифрикційними властивостями та опору підвищеним температурам. Слід зазначити слабкий опір покриття, отриманих із застосуванням цих порошоків, до абразивного зношування.

Плазмове нанесення покриття може бути виконане з використанням композиційних порошоків нікель-алюміній системи (ПТ-НА-01, НА-67, ПНА-75, ПНА-80, ПНА-95). Застосування цих порошоків дозволяє отримувати тверді покриття з високими антифрикційними властивостями. Однак покриття, отримане з використанням цих порошоків, має малу опірність знакозмінним навантаженням.

Для створення проектної технології можна запропонувати нанесення декількох шарів на деталь. Під час формування підшару застосовується порошок ПТ-НА-01. Після цього виконують нанесення декількох шарів сумішшю порошоків системи нікель-алюміній (ПН85Ю15) і порошку, який самофлюсується системи Ni-Cr-B-Si (Х17СР1). Застосування металу системи нікель-алюміній дозволить отримати хороші антифрикційні властивості поверхні валу. Застосування сплавів,

які самофлюсуються, дозволить отримати хороше зчеплення між шарами і опір ударним навантаженням.

2.3 Технологічний процес плазмового нанесення покриття при відновленні колінчастого валу компресора

У оборотній тарі вироби, які потрібно відновити, надходять на ділянку відновлення. Тимчасове розміщення виробів відбувається на стелажах для складування. Перша операція – очищення поверхні валу від забруднень. Якість її визначає правильність ходу подальших операцій й у кінцевому підсумку продуктивність і якість відновлювальних робіт. Вал очищають на установці ММА1, яка представлена на рисунку 2.3.



Рисунок 2.3 – Машина для миття ММА1

Як миючий розчин застосовують лужні препарати МЛ-51 або МЛ-52, концентрація яких становить 10...30 г/літр, а температура нагрівання – 75...80 °С. Час очищення становить 30...40 хвилин.

Друга операція – випалення мастила в масляних каналах. Для виконання цієї операції вал поміщають в електропіч та нагрівають до температури 400 °С. Тривалість випалу становить 20 хвилин.

Третя операція – дефектування. Деталі після миття надходять на стіл дефектувальника, де виконується їх перевірка на наявність неприпустимих дефектів та вимірюється величина зношування. Для виконання цієї операції застосовується мікрометр MS-111 і базова призма.

Четверта операція – очищення масляних каналів та зенкування отворів (потім закрити їх захисними азбестовими пробками).

П'ята операція – дробоструменева обробка, яка введена в проектну технологію для покращення адгезії шару, який буде напилюватися. Дробоструменева обробка дозволяє очистити поверхню деталі або ємності із застосуванням залізного дробу. Струм дробу з великою швидкістю вилітає зі спеціальної ємності і вдаряється в поверхню оброблюваної деталі, яка підлягає обробці, зі швидкістю, що досягає 60 м/с. При цьому рушійною силою дробу є стиснене повітря [13].

Шоста операція – напилення. Спочатку наноситься підшар (так звана підкладка) із застосуванням порошку ПТ-НА-01. Далі наносять кілька шарів сумішшю порошків ПН85Ю15М та Х17СР1 з різним співвідношенням компонентів. Перший шар: 95% ПН85Ю15М + 5% Х17СР1, другий шар: 90% ПН85Ю15М + 10% Х17СР1, третій шар: 85% ПН85Ю15М + 15% Х17СР1 четвертий шар: 80% ПН85Ю15М + 20% Х17СР1, п'ятий шар: 75% ПН85Ю15М + 25% Х17СР1. Сама операція представлена рисунку 2.4.

Після напилення кожного шару виконують дробоструменеву обробку поверхні. Струм напилення – 315 А, напруга на дузі – 65 В. Як транспортуючий газ застосовується азот, його витрата становить 0,5 л/хв. Як плазмоутворюючих і захисний газ застосовується аргон, його витрата становить 1,5 л/хв. Застосовується фракція порошку присадки розміром 60 мкм.



Рисунок 2.4 – Плазмове нанесення покриття при відновленні валу

Сьома операція – механічне оброблення. Після охолодження валу видаляють з нього азбестові пробки та встановлюють вал на токарний верстат. Виконують шліфування шийок на параметрах режиму:

швидкість обертання валу – $0,2 \dots 0,3$ м/сек;

швидкість обертання шліфувального круга – $25 \dots 30$ м/сек;

глибина шліфування – $0,005$ мм, поздовжня подача – $3 \dots 8$ мм/ об;

витрату охолоджуючої рідини – $0,3$ л/хв.

Восьма операція – роззенкування отворів.

Дев'ята операція – контроль якості. Виконується виявлення деталей з неприпустимими дефектами: тріщинами, відшаруваннями, ненапиленими ділянками. Виконується із застосуванням лупи з 4-кратним збільшенням та індикатора ІЧ02.

2.4 Планування ділянки відновлення валів

При відновленні валу виконують такі технологічні операції: миття, дефектація, підготовка поверхні, плазмове відновлення, контроль якості. Ремонтна діляниця, представлена на рисунку 2.5, розташовується в північній частині ремонтного цеху виробництва та передбачає розміщення наступних основних видів обладнання:

- 1 – стелаж для зношених деталей;
- 2 – ванна для миючого розчину;
- 3 – верстак слюсарний;
- 4 – комплекс контрольно-вимірювальний;
- 5 – верстат свердлильний;
- 6 – електропіч СНТ;
- 7 – камера дробоструменева;
- 8 – пост нанесення захисних покриттів;
- 9 – установка для напилення УПУ-8М
- 10 – канали вентиляційні;
- 11 – екран захисний;
- 12 – візок для перевезення та зберігання деталей;
- 13 – візок для перевезення балонів з газом;
- 14 – стелаж для зберігання готової продукції;
- 15 – ванна мийна;
- 16 – стелаж для зберігання ремонтного фонду та інших інструментів та матеріалів;
- 17 – циклон пиловловлюючий;
- 18 – вентиляція припливна;
- 19 – вентиляція припливна пиловидаляючий.

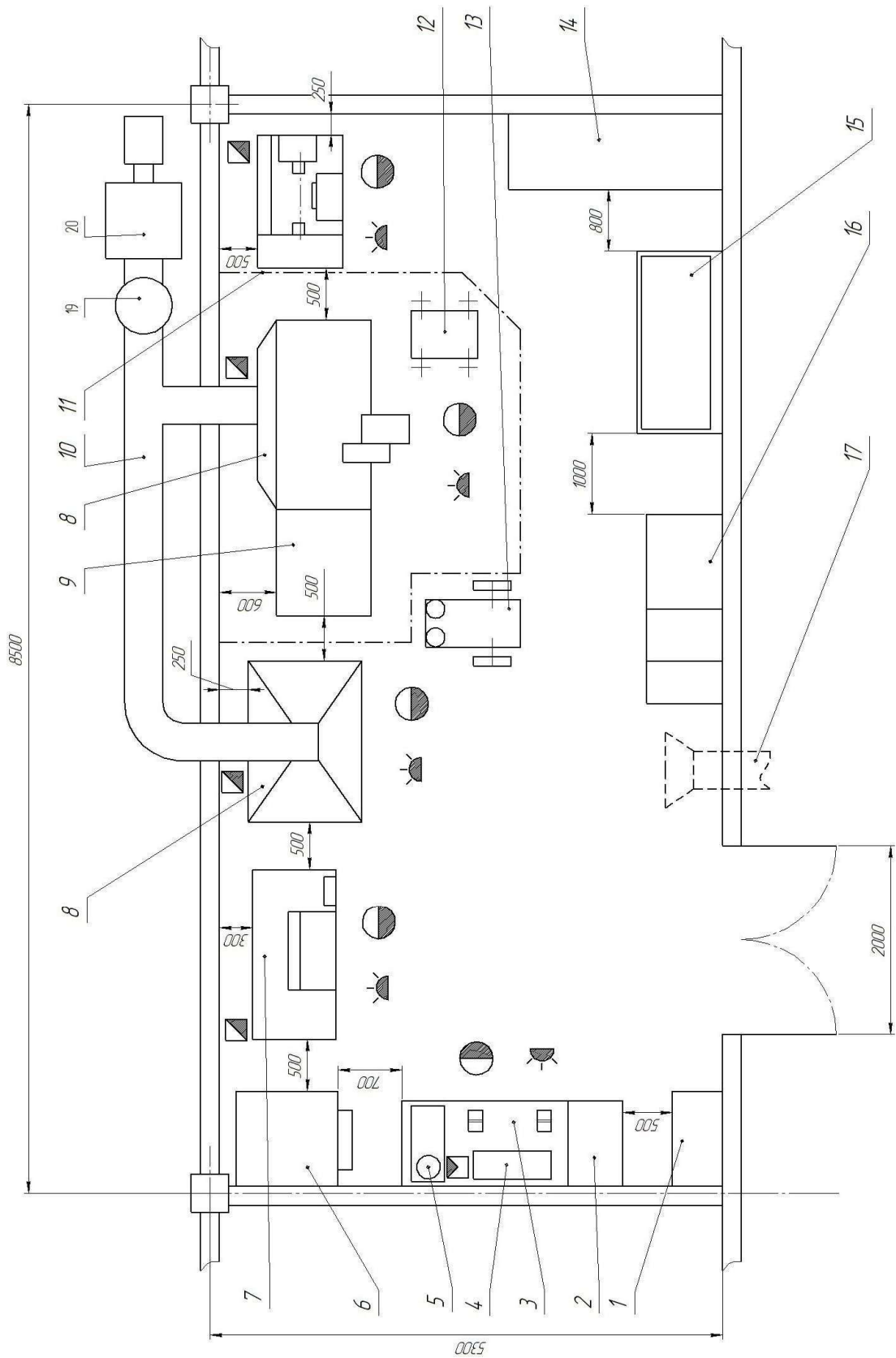


Рисунок 2.5 – Планування дільниці відновлення деталей

Висновки по другому розділу

На підставі раніше проведеного аналізу переваг та недоліків можливих способів наплавлення прийнято рішення в проектній технології використовувати плазмове напилення. Виконано аналіз наявних на ринку порошків для нанесення плазмового покриття, прийнято рішення використовувати порошок ПТ-НА-01 для виконання підшару (так звана підкладка). Для виконання відновлювальних шарів запропоновано застосовувати порошки ПН85Ю15М та Х17СР1.

Наведено опис операцій технологічного процесу відновлення валу із застосуванням плазмового нанесення покриття, оптимізовано параметри режимів обробки та обладнання для здійснення проектної технології.

Для розміщення технологічного обладнання, задіяного у виконанні цих операцій, виконано планування виробничої ділянки.

3 КОНСТРУКТОРСЬКО-ДОСЛІДНИЦЬКИЙ РОЗДІЛ

3.1 Кінематичний розрахунок коробки швидкостей верстату 1А364

Спроекована нами установка для плазмового нанесення покриття для відновлення колінчатого валу розроблена базі токарного верстата 1А364, який вже є в наявності. Проте для розширення технологічних можливостей спроекованого стенду для відновлення валів різної номенклатури потрібно дещо вдосконалити токарний верстат, а саме його коробку швидкостей. Розширення діапазону швидкостей обертання шпинделя та підвищення запасу міцності валів приводу головного руху дасть можливість відновлювати вали більшої маси та габаритів. Для спроекованого нами обладнання для відновлення валів основною задачею з модернізації верстату є пониження нижньої межі частот обертання головного руху.

Виходячи з вихідних даних, приймаємо граничні швидкості оброблення.

$$v_{\max} = 130 \text{ м/хв.}$$

$$v_{\min} = 2,5 \text{ м/хв.}$$

Верхню і нижню межу чисел обертів шпинделя розраховують за формулами [7]:

$$n_{\max} = \frac{1000 \cdot v_{\max}}{\pi \cdot d_{\min}} \text{ об/хв.}; \quad (3.1)$$

$$n_{\min} = \frac{1000 \cdot v_{\min}}{\pi \cdot d_{\max}} \text{ об/хв.}; \quad (3.2)$$

$$n_{\max} = \frac{1000 \cdot 130}{3.14 \cdot 20} = 2070 \text{ об/хв}$$

приймаємо $n_{\max} \approx 2000 \text{ об/хв.};$

$$n_{\min} = \frac{1000 \cdot 2,5}{3.14 \cdot 20} = 39,8 \text{ об/хв.};$$

Визначаємо діапазон регулювання чисел обертів шпинделя[10]:

$$R = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{2000}{39,8} = 50,25 \quad (3.3)$$

Підбираємо значення ряду геометричної прогресії φ , вибір якого буде обґрунтовуватися необхідною точністю регулювання швидкостей, ступенем універсальності верстату і його типом.

Приймаємо $\varphi = 1,26$.

Визначаємо число ступенів коробки швидкостей:

$$z = \frac{\lg R}{\lg \varphi} + 1; \quad (3.4)$$

$$z = \frac{\lg 50,25}{\lg 1,26} + 1 = 17,9.$$

Заокругливши, встановлюємо ціле число ступенів коробки швидкостей до $z = 18$.

Маючи число ступенів z складаємо структурну формулу, яка записується у вигляді математичного добутку:

$$z = P_1(x_1) \cdot P_2(x_2) \cdot P_3(x_3) \cdot \dots, \quad (3.5)$$

де $P_1, P_2, P_3 \dots$ – число, яке вказує на кількість передач в кожній незалежній групі;

$x_1, x_2, x_3 \dots$ – характеристики відповідних незалежних груп.

Запропонуємо деякі варіанти структурної формули коробки швидкостей:

$$z = 18 = 3_{(1)} \cdot 3_{(3)} \cdot 2_{(9)},$$

$$z = 18 = 3_{(3)} \cdot 3_{(1)} \cdot 2_{(9)},$$

$$z = 18 = 3_{(3)} \cdot 2_{(9)} \cdot 3_{(1)},$$

$$z = 18 = 3_{(1)} \cdot 2_{(9)} \cdot 3_{(3)}.$$

Для забезпечення необхідних мінімальних габаритів коробок швидкостей необхідно, щоб виконувались умови [12]:

$$P_1 > P_2 > P_3 > \dots; \quad x_1 < x_2 < x_3 < \dots \quad (3.6)$$

3.2 Побудова та аналіз структурної сітки

Структурна сітка дає необхідну інформацію про кількість передач між валами, знаменника і діапазону регулювання елементарних коробок, послідовності включення передач для забезпечення ряду частот обертання шпинделя. Структурна сітка характеризує закономірності зміни передаточних відношень в групових передачах при зміні частот обертання шпинделя по геометричному ряду [15].

Число валів в коробці рівне $(m+1)$, відповідно.

Структурну сітку будуємо в наступному порядку (рисунок 3.1):

1) На кресленні в довільному масштабі представляємо структурну сітку. Кількість вертикальних прямих ліній, рівна $(m+1)$, відповідає числу валів коробки, в нашому випадку, при $m = 3$, число валів – чотири.

2) На рівновіддаленій відстані один від одного наносимо стільки горизонтальних ліній, скільки ступенів частот обертання має мати спроектована коробка. У нашому випадку, число ступенів дорівнює 18 (рис. 3.1).

3) Проводимо на лінії четвертого валу (без вказання величин) точки $n_1 - n_{18}$, – частоти обертання шпинделя. Перший вал має одну частоту обертання, отже на вертикальній лінії першого валу наносимо вихідну точку 0 симетрично відносно $n_{\min} = n_1$ і $n_{\max} = n_{18}$, на рівні між n_9 і n_{10} .

4) Перша група складається з трьох передач, тому з точки 0 проводимо два промені, при цьому першому множнику Z_1 відповідає характеристика $x = 1$, тобто на вертикальній лінії валу на структурній сітці відстань між точками 1–2–3 дорівнює одному інтервалу. Для наступного множника Z_3 характеристика $x = 3$, а відстань між точками 4 – 7 – 10, 5 – 8 – 11 і 6 – 9 – 12 дорівнює трьом інтервалам, для множника Z_9 характеристика рівна $x = 9$ і відстань між $n_1 - n_{10}$, $n_2 - n_{11}$, $n_3 - n_{12}$, $n_4 - n_{13}$, $n_5 - n_{14}$, $n_6 - n_{15}$, $n_7 - n_{16}$, $n_8 - n_{17}$, $n_9 - n_{18}$ рівне дев'ятьом інтервалам.

5) Отримані точки з'єднуємо відповідно променями.

Варіант 1:

$$z = 18 = 3_{(1)} \cdot 3_{(3)} \cdot 2_{(9)}$$

Структурна сітка

$$18 = 3_{(1)} \times 3_{(3)} \times 2_{(9)}$$

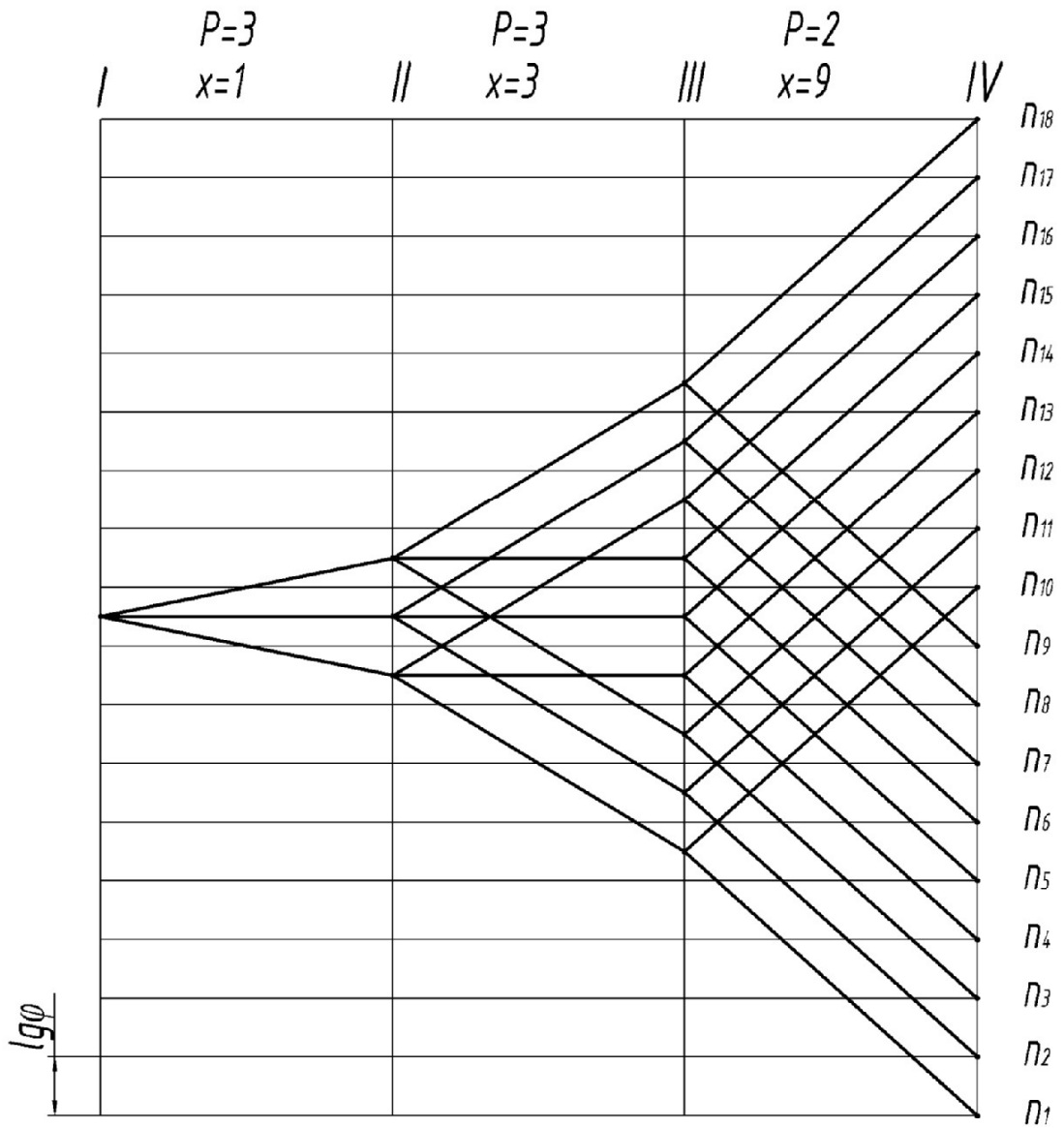


Рисунок 3.1 – Оптимальний варіант структурної сітки при заданому $z=18$

Варіант 2:

$$z = 18 = 3_{(3)} \cdot 3_{(1)} \cdot 2_{(9)}$$

Структурна сітка

$$18 = 3_{(3)} \times 3_{(1)} \times 2_{(9)}$$

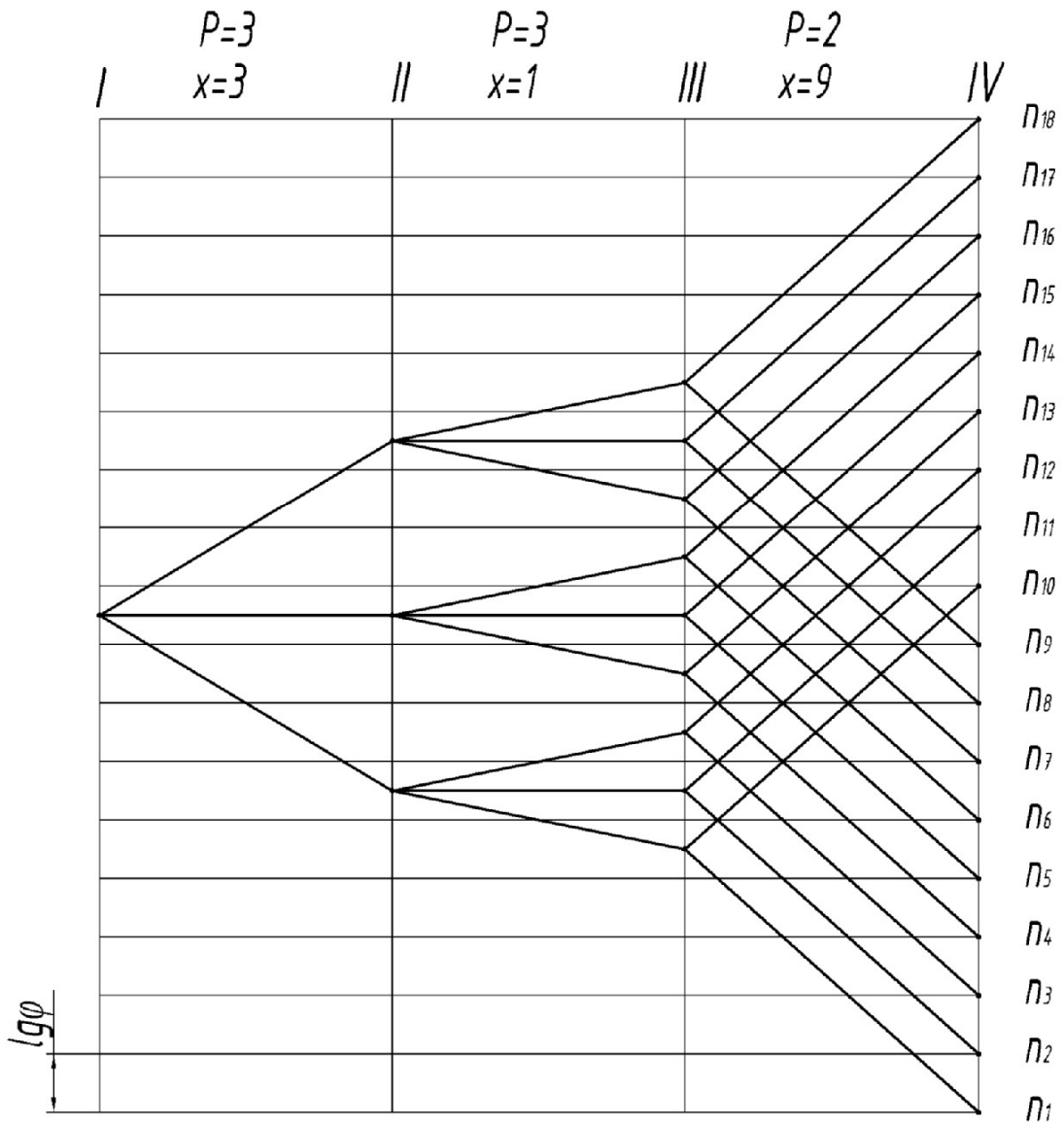


Рисунок 3.2 –Варіант 2 структурної сітки коробки швидкостей

Варіант 3:

$$z = 18 = 3_{(3)} \cdot 2_{(9)} \cdot 3_{(1)}$$

Структурна сітка

$$18 = 3_{(3)} \times 2_{(9)} \times 3_{(1)}$$

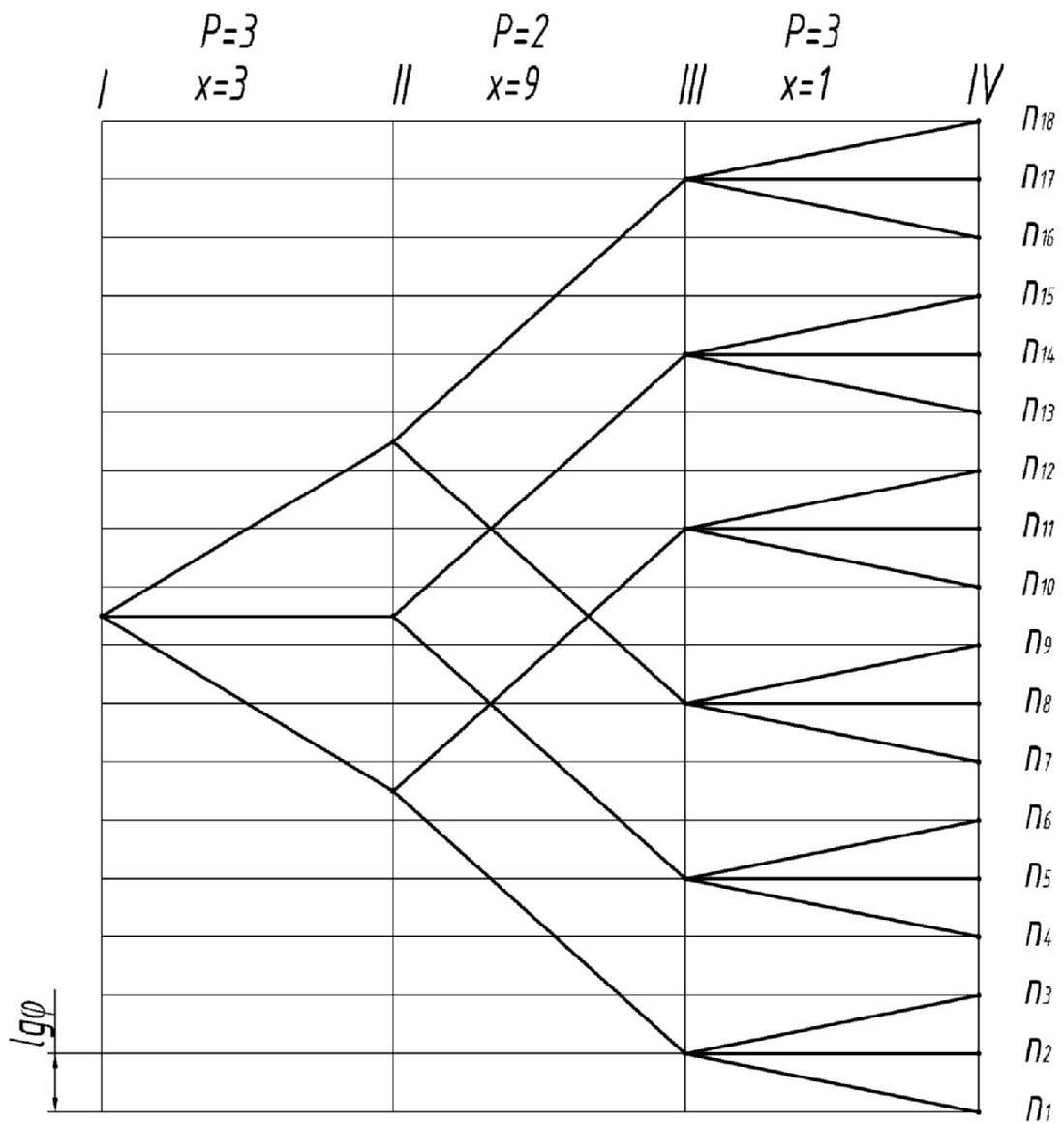


Рисунок 3.3 –Варіант 3 структурної сітки коробки швидкостей

Варіант 4:

$$z = 18 = 3_{(1)} \cdot 2_{(9)} \cdot 3_{(3)}$$

Структурна сітка

$$18 = 3_{(1)} \times 2_{(9)} \times 3_{(3)}$$

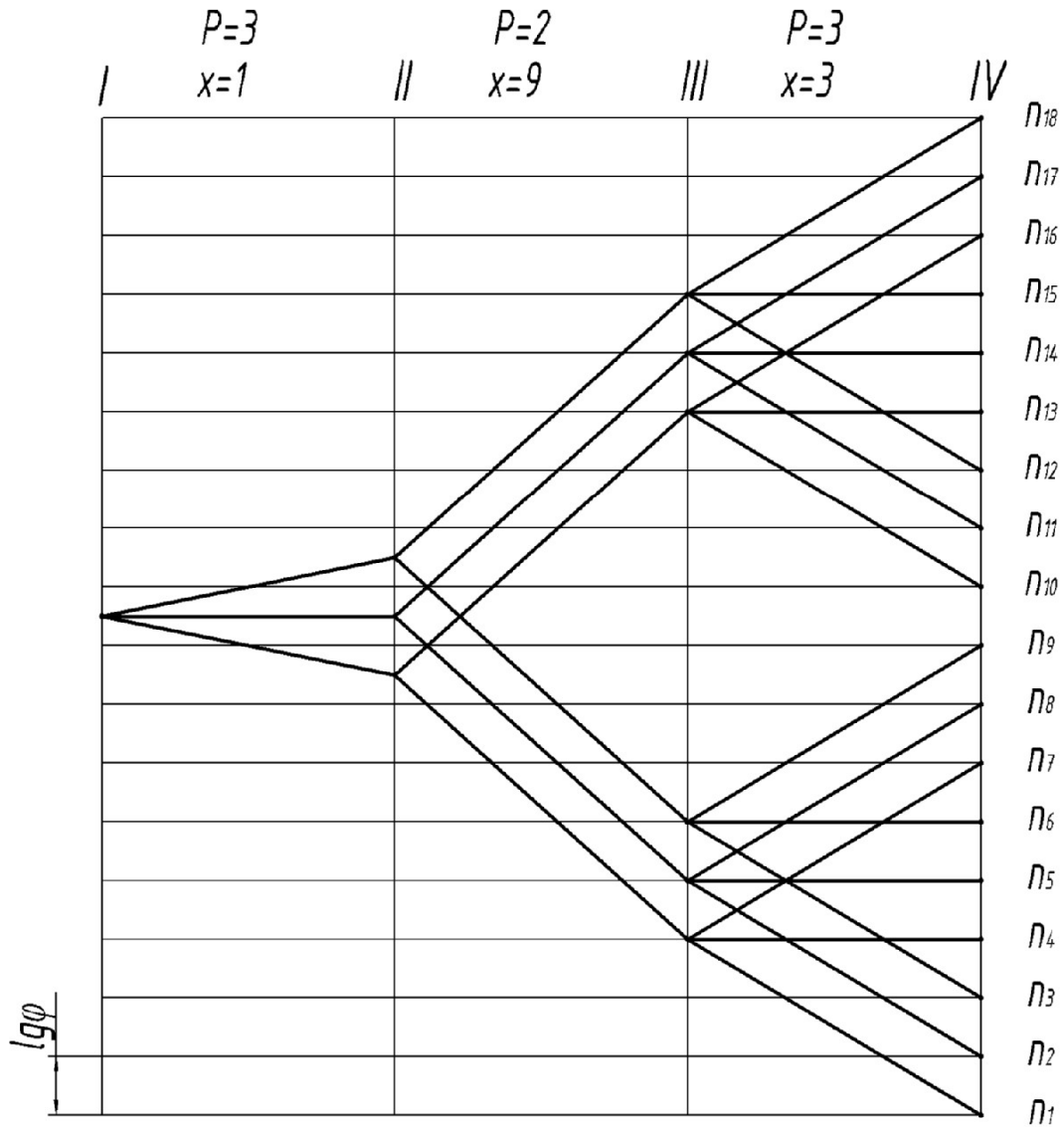


Рисунок 3.4 –Варіант 4 структурної сітки коробки швидкостей

Виходячи з наших умов експлуатації верстату 1А364 та рекомендацій, щодо проектування металообробного обладнання вибираємо найбільш нам оптимальний

варіант структурної сітки, яка є симетрична в межах кожної групи (рисунок 3.1)

Записуємо вибраний нами оптимальний варіант структурної формули:

$$z = 3_{(1)} \cdot 3_{(3)} \cdot 2_{(9)}$$

Проводимо її аналіз на предмет граничного діапазону регулювання:

$$x_3 = \frac{\lg 8}{\lg 1,26} \approx 9, \quad (3.7)$$

Зважаючи на це, побудова графіка чисел обертів у вигляді нормальної структури можлива з точки зору методики побудови структурних сіток коробок швидкостей металообробних верстатів[10].

3.3 Побудова графіка чисел обертів

Графік частот обертів (структурний графік), який представлений на рисунку 3.5 є видозміненою структурною сіткою. Він показує реальні значення окремих передаточних відношень передач і частот обертання валів.

Для побудови графіка частот обертання необхідно розрахувати числа обертання шпинделя за формулою [10]:

$$n_i = n_{\min} \cdot \varphi^{n-1}. \quad (3.8)$$

1) Уточнюємо числа обертів шпинделя згідно стандартного значення знаменника φ .

Найближче мінімальне значення згідно норми $n = 40 \text{ хв.}^{-1}$. Для нашого прикладу при $\varphi = 1,26$.

$$n_1 = n_{\min} = 40 \text{ об/хв.}; \quad n_{10} = n_{\min} \cdot \varphi^9 = 40 \cdot 1,26^9 = 320 \text{ об/хв.};$$

$$n_2 = n_{\min} \cdot \varphi^1 = 40 \cdot 1,26^1 = 50,4 \text{ об/хв.}; \quad n_{11} = n_{\min} \cdot \varphi^{10} = 40 \cdot 1,26^{10} = 403 \text{ об/хв.};$$

$$n_3 = n_{\min} \cdot \varphi^2 = 40 \cdot 1,26^2 = 63 \text{ об/хв.}; \quad n_{12} = n_{\min} \cdot \varphi^{11} = 40 \cdot 1,26^{11} = 508 \text{ об/хв.};$$

$$n_4 = n_{\min} \cdot \varphi^3 = 40 \cdot 1,26^3 = 80 \text{ об/хв.}; \quad n_{13} = n_{\min} \cdot \varphi^{12} = 40 \cdot 1,26^{12} = 640 \text{ об/хв.};$$

$$n_5 = n_{\min} \cdot \varphi^4 = 40 \cdot 1,26^4 = 100,8 \text{ об/хв.}; \quad n_{14} = n_{\min} \cdot \varphi^{13} = 40 \cdot 1,26^{13} = 807 \text{ об/хв.};$$

$$n_6 = n_{\min} \cdot \varphi^5 = 40 \cdot 1,26^5 = 127 \text{ об/хв.}; \quad n_{15} = n_{\min} \cdot \varphi^{14} = 40 \cdot 1,26^{14} = 1016 \text{ об/хв.};$$

$$n_7 = n_{\min} \cdot \varphi^6 = 40 \cdot 1,26^6 = 160 \text{ об/хв.}; \quad n_{16} = n_{\min} \cdot \varphi^{15} = 40 \cdot 1,26^{15} = 1281 \text{ об/хв.};$$

$$n_8 = n_{\min} \cdot \varphi^7 = 40 \cdot 1,26^7 = 201,6 \text{ об/хв.}; \quad n_{17} = n_{\min} \cdot \varphi^{16} = 40 \cdot 1,26^{16} = 1614 \text{ об/хв.};$$

$$n_9 = n_{\min} \cdot \varphi^8 = 40 \cdot 1,26^8 = 254,1 \text{ об/хв.}; \quad n_{18} = n_{\min} \cdot \varphi^{17} = 40 \cdot 1,26^{17} = 2034 \text{ об/хв.};$$

При $z = 18$ та $\varphi = 1,26$ ряд чисел обертів шпинделя згідно норм буде: 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000.

Побудуємо графіки чисел обертів.

Графік чисел обертів

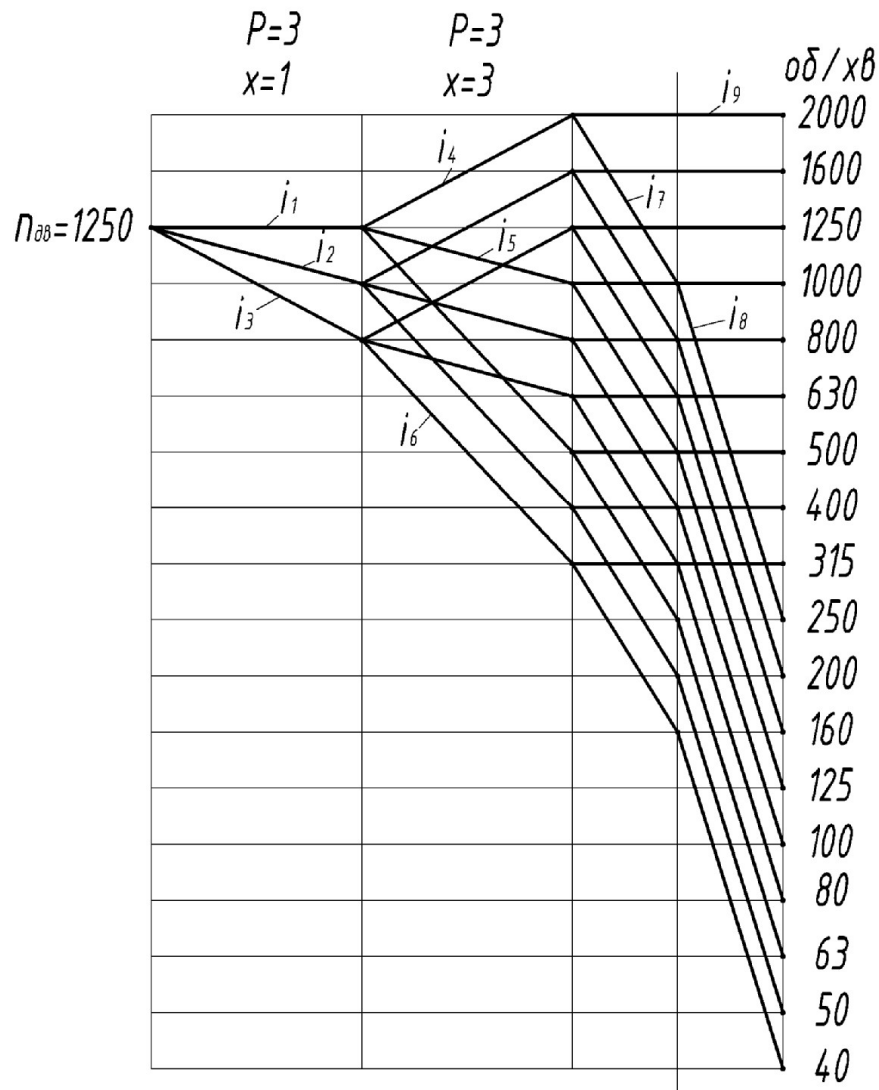


Рисунок 3.5 – Графік чисел обертів шпинделя верстата

Розкладаємо привід на дві частини, тобто окремо коробку швидкостей і шпindelьну бабку з переборною групою. Тобто

$$z = 18 = 9 \cdot 2 = z^I \cdot z^{II}.$$

тоді отримуємо

$$z^I = 9 = 3_{(1)} \cdot 3_{(3)}$$

$$z^{II} = 2_{(9)}$$

z^I – коробка швидкостей ;

z^{II} – шпindelьна бабка з переборною групою.

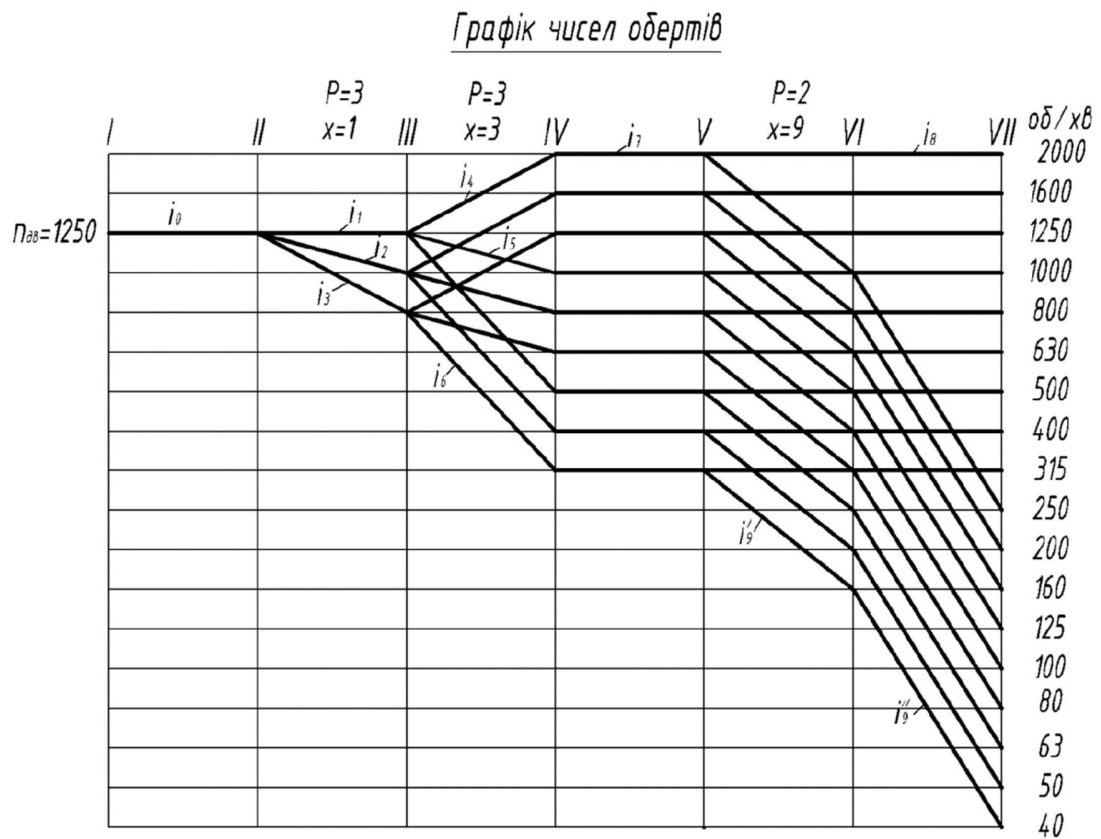


Рис. 3.6 – Графік чисел обертів шпindelя верстата з переборною групою

3.4 Визначення передаточних відношень

Передаточні відношення повинні задовольняти дві умови згідно з [3]:

1) Передаточні відношення в групах повинні частково зменшуватися по наближенню до шпинделя.

2) Для обмеження розмірів зубчастих коліс і радіальних габаритів коробок швидкостей нормами верстатобудування встановлені межі передаточних відношень:

$$\frac{1}{4} \leq i \leq 2. \quad (3.9)$$

для $z = 3_{(1)} \cdot 3_{(3)} \cdot 2_{(9)}$ і $\varphi = 1,26$

$$i_{\max} = \varphi^2 = 1,26^2 = 1,58 \text{ і } i_{\min} = \varphi^{-6} = 1,26^{-6} = \frac{1}{4} = 0,25 \quad (3.10)$$

У даному випадку дотримуються обидві умови, отже розроблена структура може бути застосована для спроектованої нами коробки швидкостей верстата 1А364 відповідно до умов його використання. За отриманими даними побудуємо коробку швидкостей.

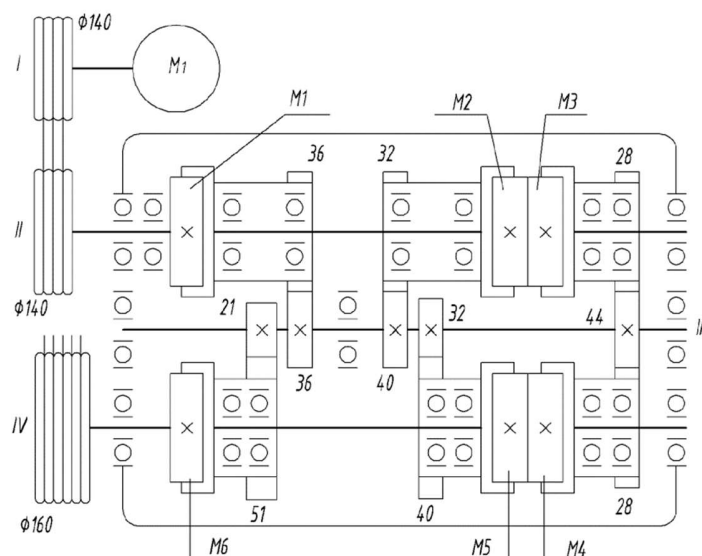


Рисунок 3.7 – Спроекована коробка швидкостей для верстату 1А364

Згідно розробленого графіку чисел обертів легко визначити передаточні відношення окремих пар зубчастих коліс. Для понижаючих передач передаточне відношення $i = \frac{1}{\varphi^x}$, де x – число клітинок структурного поля, на яке спустився промінь відповідної передачі. Для прискорюючих передач $i = \varphi^x$, де x – число клітинок на яке піднявся відповідний промінь.

Для графіку чисел обертів будемо мати:

$$i_0 = \frac{d_1}{d_2} = \varphi^0 = 1, \quad (3.11)$$

d_1, d_2 – діаметри ведучого і веденого шківів (у випадку зв'язку між двигуном і першим валом з допомогою пасової передачі).

Для першої двухвальної передачі приймаємо:

$$I \begin{cases} i_1 = \varphi^0 = \frac{z_1}{z_2} = 1 \\ i_2 = \varphi^{-1} = \frac{z_3}{z_4} = \frac{1}{1,26} \\ i_3 = \varphi^{-2} = \frac{z_5}{z_6} = \frac{1}{1,58} \end{cases} \quad (3.12)$$

Маючи конкретні значення передаточних відношень для кожної незалежної групи можемо визначити числа зубів окремих пар зубчастих коліс, що входять в неї.

При розрахунку необхідно дотримуватися слідуючих умов:

- мінімальні числа зубів ведучого колеса 18-20, максимальні для веденого колеса – 100.

- для забезпечення постійності міжосьової відстані суми чисел зубів зв'язаних коліс мають бути рівними, тобто

$$z_1 + z_2 = z_3 + z_4 = z_5 + z_6 = \dots = \text{const}, \quad (3.13)$$

де z_1, z_3, z_5, \dots – числа зубів ведучих зубчастих коліс елементарної двох валової передачі; z_2, z_4, z_6, \dots – відповідні ним числа зубів ведених зубчастих коліс.

Виходячи з цієї умови можемо записати так:

$$\begin{cases} z_1 + z_2 = z_3 + z_4 = z_5 + z_6 = \Sigma z = 72 \\ \frac{z_1}{z_2} = i_1.; \frac{z_3}{z_4} = i_2.; \frac{z_5}{z_6} = i_3. \end{cases} \quad (3.14)$$

З довідникових даних, де по горизонталі відкладена сума зубів, а по вертикалі – передаточні відношення, кратні 1,06. Порожні клітки означають, що при даному значенні Σz передаточне відношення не може бути витримане в необхідних межах $\pm 10(\varphi - 1)\%$, в останніх клітках вказано число зубів меншого зубчастого колеса.

Отже, вибираємо сумарне число зубів $\Sigma z = 72$ (при $i_1 = 1$, $i_2 = \frac{1}{1,26}$, $i_3 = \frac{1}{1,58}$)

$$z_1 = z_2 = 36; z_3 = 32, z_4 = 40; z_5 = 28, z_6 = 44.$$

$$\frac{z_1}{z_2} = i_1 = \frac{36}{36} = 1; \frac{z_3}{z_4} = i_2 = \frac{32}{40} = \frac{1}{1,26}; \frac{z_5}{z_6} = i_3 = \frac{28}{44} = \frac{1}{1,58}.$$

Для другої двох валової передачі приймаємо:

$$\text{II} \begin{cases} i_4 = \varphi^2 = \frac{z_7}{z_8} = 1,58, \\ i_5 = \varphi^{-1} = \frac{z_9}{z_{10}} = \frac{1}{1,26}, \\ i_6 = \varphi^{-4} = \frac{z_{11}}{z_{12}} = \frac{1}{2,52}. \end{cases}$$

$$\begin{cases} z_7 + z_8 = z_9 + z_{10} = z_{11} + z_{12} = \Sigma z = 72; \\ \frac{z_7}{z_8} = i_4.; \frac{z_9}{z_{10}} = i_5.; \frac{z_{11}}{z_{12}} = i_6. \end{cases}$$

Приймаємо $z_{\min} = 21$ для передачі з мінімальним або максимальним передаточним відношенням можна знайти числа зубів окремих пар передач. При цьому система рівнянь:

$$\begin{cases} z_7 + z_8 = z_9 + z_{10} = z_{11} + z_{12} = \Sigma z; \\ \frac{z_7}{z_8} = i_4.; \frac{z_9}{z_{10}} = i_5.; \frac{z_{11}}{z_{12}} = i_6. \end{cases}$$

$$z_7 = 44; z_8 = 28;$$

$$z_9 = 32; z_{10} = 40;$$

$$z_{11} = 21; z_{12} = 51.$$

передаточне відношення пасової передачі:

$$i_7 = \frac{d_3}{d_4} = \varphi^0 = 1;$$

$$\begin{cases} i_8 = \varphi^0 = 1, \\ i_9 = \varphi^{-9} = \frac{1}{8}. \end{cases}$$

Оскільки $i_9 \leq i_{\max} = \frac{1}{4}$, то i_9 розкладемо на два значення $i_9^I \cdot i_9^{II} = \varphi^{-3} \cdot \varphi^{-6} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{4}$;

$$i_9^I = \varphi^{-3} = \frac{z_{13}}{z_{14}} = \frac{1}{1,26^3} = \frac{1}{2},$$

$$i_9^{II} = \varphi^{-6} = \frac{z_{15}}{z_{16}} = \frac{1}{1,26^6} = \frac{1}{4},$$

Тоді $z_{13} + z_{14} = z_{15} + z_{16} = \Sigma z = 100$ (102)

$$z_{13} = 34; z_{14} = 68;$$

$$z_{15} = 20; z_{16} = 80.$$

3.5 Розрахунок валів коробки швидкостей з використанням CAD/CAE систем

Проведемо розрахунок валів коробки швидкостей на міцність та твердість. Розглянемо другий та третій вали. Проведення даних розрахунків здійснюємо із застосуванням програмних продуктів SolidWorks і COSMOSWorks.

Для цього розроблено 3D моделі в програмному середовищі SolidWorks. Аналіз навантаження цих 3D моделей проведемо з використанням програмного пакету COSMOSworks.

Вихідні дані для розрахунків визначені по наступних формулах:

колове зусилля:

$$F_t = \frac{2000T_i}{d_i},$$

де T_i – крутний момент на i -м валу; d_i – дільний діаметр i -го зубчастого колеса.

осьове зусилля:

$$F_a = F_t \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

де β – кут нахилу зубів, $\beta=15^\circ$.

радіальне зусилля:

$$F_r = \frac{F_t}{\cos \beta} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

де α – кут зачеплення, $\alpha=20^\circ$.

$$F_{t_1} = \frac{2000 \cdot 679,8}{465,9} = 2918,2H;$$

$$F_{a_1} = 2918,2 \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 781,9H;$$

$$F_{r_1} = \frac{2918,2}{\cos 15^\circ} \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 1099,6H.$$

$$F_{t_2} = \frac{2000 \cdot 2040,3}{223,6} = 18249,6H;$$

$$F_{a_2} = 18249,6 \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 4889,9H;$$

$$F_{r_2} = \frac{18249,6}{\cos 15^\circ} \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 6876,6H.$$

$$F_{t_3} = \frac{2000 \cdot 2040,3}{670,9} = 6082,3H;$$

$$F_{a_3} = 6082,3 \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 1629,8H;$$

$$F_{r_3} = \frac{6082,3}{\cos 15^\circ} \cdot \operatorname{tg} 20^\circ = 2291,9H.$$

$$F_{t_4} = \frac{2000 \cdot 5895,6}{289,9} = 40673,3H;$$

$$F_{a_4} = 40673,3 \cdot \operatorname{tg} 15^\circ = 10898,4H;$$

Результати моделювання та проведених розрахунків показано на рисунках 3.8 – 3.11.

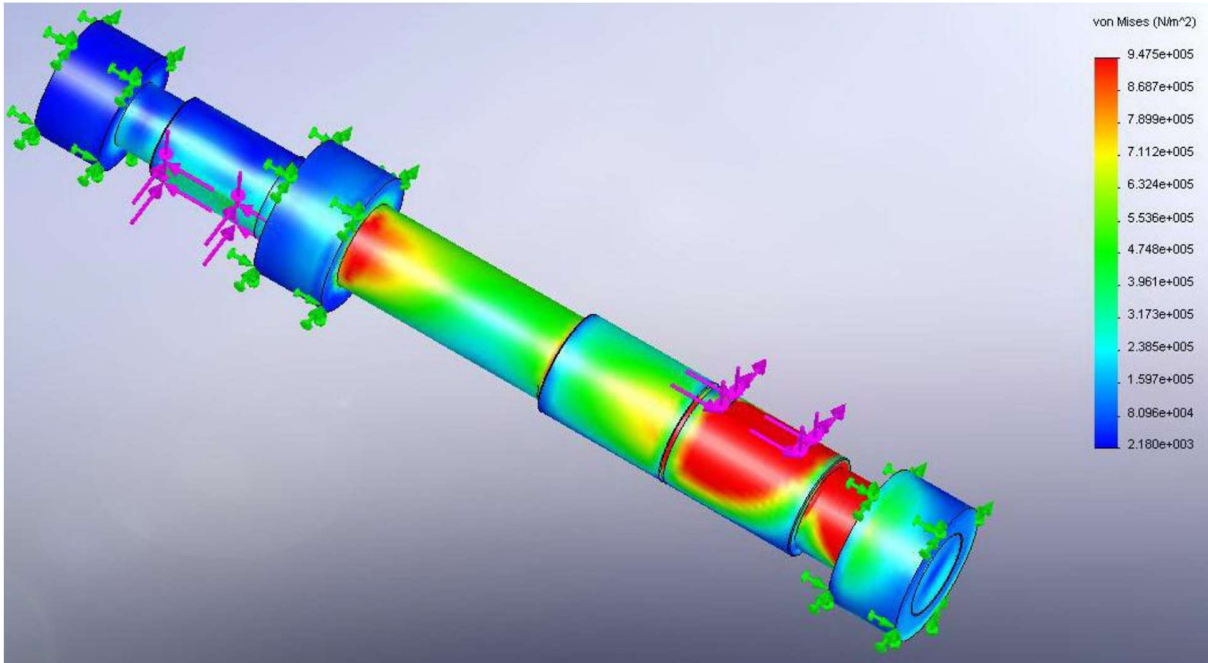


Рисунок 3.8 – Розрахунок статичного вузлового напруження другого валу в програмі COSMOSWorks

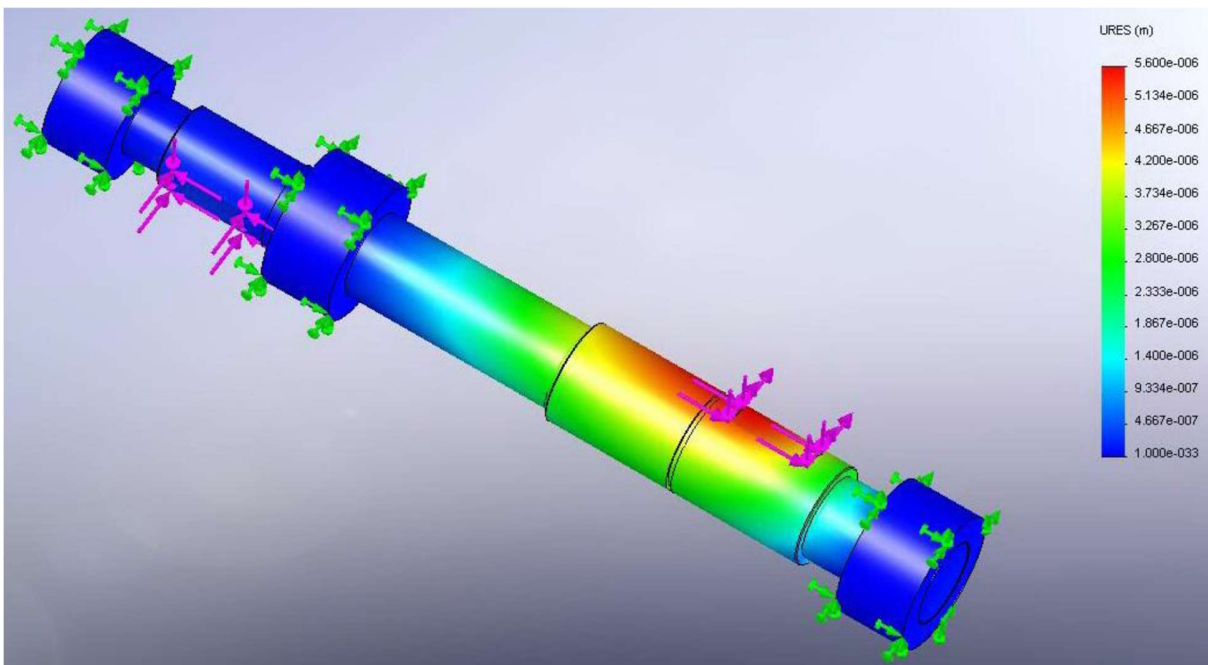


Рисунок 3.9 – Розрахунок статичної деформації другого валу в програмі COSMOSWorks

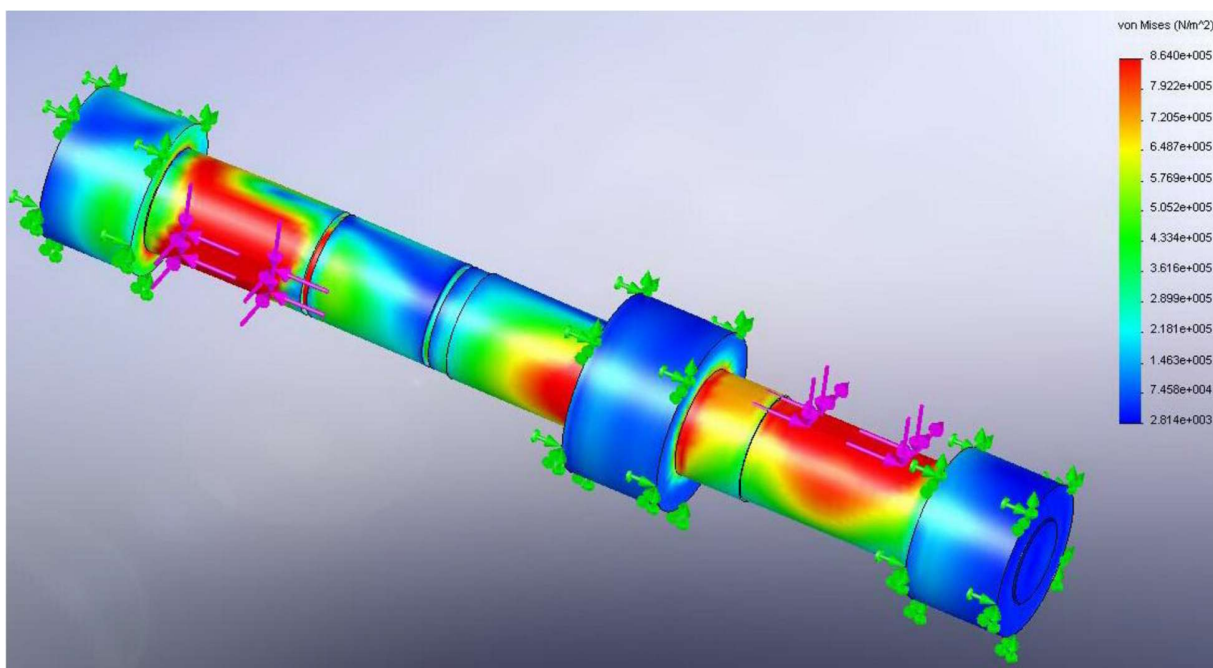


Рисунок 3.10 – Розрахунок статичного вузлового напруження третього валу в програмі COSMOSWorks

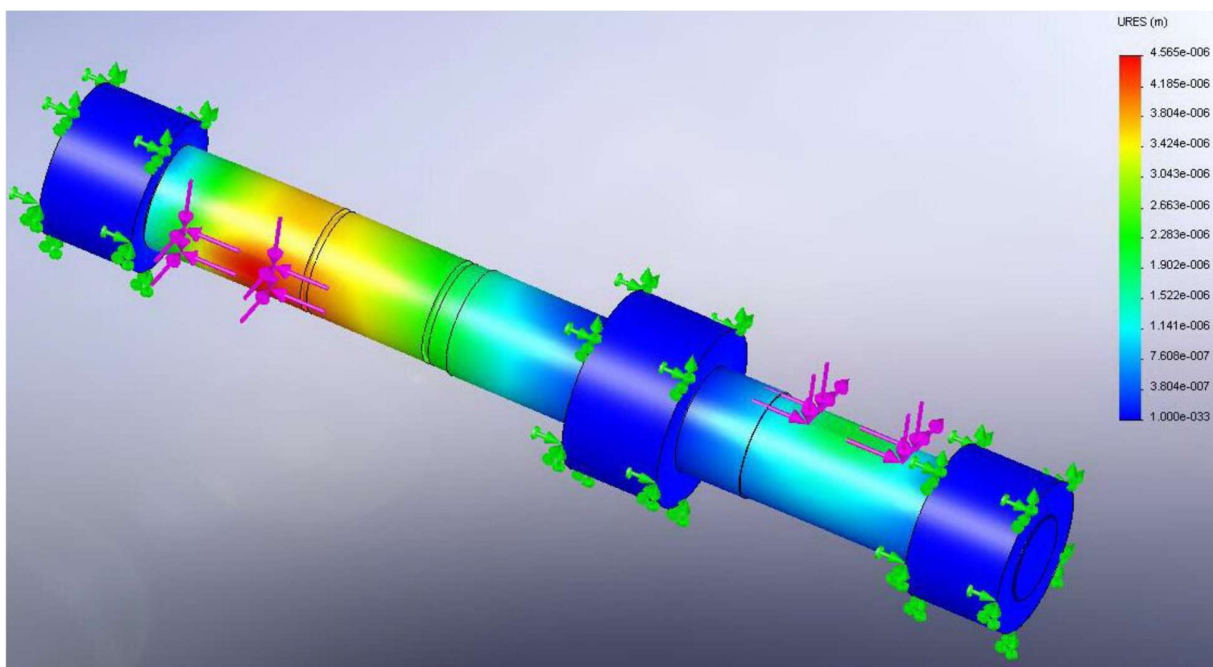


Рисунок 3.11 – Розрахунок статичної деформації третього валу в програмі COSMOSWorks

Після проведених розрахунків ми отримали, що другий вал має коефіцієнт запасу міцності 45, третій вал – 19; максимальна деформація другого вала рівна 5,60 мкм, третього валу – 4,57 мкм; максимальні напруження на другому валу досягають 1 Мпа, на третьому валу – 0,9 Мпа.

Таким чином можна стверджувати, що запропоновані конструкції розглянутих валів спроектованої коробки швидкостей відповідають необхідним умовам.

Висновки по третьому розділу

Для розширення технологічних можливостей спроектованого станку для відновлення валів різної номенклатури вдосконалено токарний верстат 1А364, а саме його коробку швидкостей. Розширено діапазон швидкостей обертання шпинделя з одночасним зменшення нижньої межі частот обертання головного руху.

Проведено моделювання навантаження на вали спроектованої коробки швидкостей що дає можливість стверджувати, що запропонована конструкція коробки швидкостей відповідає необхідним умовам експлуатації на максимальних режимах роботи.

4 РОЗРОБКА START-UP ПРОЄКТУ З ВІДНОВЛЕННЯ ВАЛІВ

4.1 Опис ідеї проєкту

В останній час значного поширення серед організацій-різного напрямку діяльності та форми власності, різних об'єднань молодих вчених набули start-up проєкти (стартапи). Стартап – це щойно створена компанія (можливо, навіть не є ще юридичною особою), яка знаходиться на стадії розвитку і будує свій бізнес або на основі нових інноваційних ідей, або на основі технологій, які щойно з'явилися [6].

Для стартапу характерні: обмеженість початкових капіталовкладень; швидкий розвиток; низькі шанси на успішну реалізацію. Основним документом, що характеризує стартап, є бізнес-план – обов'язковий письмовий документ, що визначає ділові можливості та перспективи подальшого розвитку, а також роз'яснює, як ці можливості можуть бути реалізовані наявною командою.

Для задоволення потреб машинобудування, металообробки та інших галузей наразі необхідно ширше використовувати різні технології оброблення матеріалів та нанесення функціональних покриттів. Вони можуть забезпечити довговічності та надійності деталей машин та інструменту, які працюють в складних умовах експлуатації, шляхом зміцнення поверхневого шару виробів. Розробка методів і технологій відновлення деталей машин, нанесення захисних покриттів на робочій поверхні та підвищення фізико-механічних характеристик отриманих шарів є дуже важливим завданням [6].

Ідея стартап-проєкту, як така, окремо не вартує майже нічого. Головним завданням керівника проєкту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проєкту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

Метою даного розділу є формування інноваційного мислення, підприємницького духу та формування здатностей щодо оцінювання ринкових перспектив і можливостей комерціалізації основних науково-технічних розробок, сформованих у попередніх розділах кваліфікаційної роботи магістра у вигляді розробки концепції стартап-проєкту в умовах висококонкурентної ринкової економіки регіональних процесів.

Завданням даного розділу є маркетинговий аналіз перспектив реалізації запропонованих вище науково-технічних рішень та пропозицій, оцінювання можливостей їх ринкового впровадження.

Ідея проєкту впровадження вдосконаленої технології з відновлення колінчатих валів та валів інших видів з наданням відповідних послуг подамо у вигляді таблиці 4.1. Це дасть цілісне уявлення про зміст ідеї та можливі базові потенційні ринки, в межах яких потрібно шукати групи потенційних клієнтів.

Таблиця 4.1 – Опис ідеї проєкту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Відновлення валів за допомогою технологій плазмового напилення	Автомобілі	1. Подовження ресурсу роботи валу є більш економічно вигідно ніж купівля нового. 2. Отримання більш зносостійкого поверхневого шару валу.
	Промислові машини та обладнання	
	Сільськогосподарська техніка	

4.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

Проведення аудиту технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проєкту (технології створення товару, надання послуг) дає можливість для

наступного визначення технологічної здійсненності ідеї проєкту та передбачає аналіз таких складових (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Технологічна здійсненність ідеї проєкту

Ідея проєкту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність
Відновлення валів за допомогою технологій плазмового напилення	Детонаційне нанесення покриття	Технологія наявна	Недоступна
	Плазмове напилення	Технологія наявна	Доступна та вдосконалена
	Електроіскрове	Технологія наявна, потрібне доопрацювання	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проєкту: За результатами аналізу таблиці ми прийшли до висновку, що ідея проєкту відновлення валів за допомогою технологій плазмового напилення можлива в технічному плані, тому вибираємо технологію плазмового напилення.			

4.3 Ринковий аналіз можливостей впровадження проєкту

Визначення ринкових можливостей, які можливо використати під час ринкового впровадження проєкту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проєкту, дозволяє спланувати напрями розвитку проєкту із врахуванням стану ринку регіону (м. Луцьк та Луцький район), потреб потенційних клієнтів та пропозицій конкурентів.

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики та формуємо орієнтовний перелік вимог до товарів та послуг для кожної групи та зводимо у таблицю 4.3.

Таблиця 4.3 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проєкту

Потреба, яка формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару та послуг
Відновлення валів за допомогою технологій плазмового напилення	Автомобілі, промислові машини та обладнання, сільськогосподарська техніка	Відмінність стандартів, технічних та регламентних норм	<ol style="list-style-type: none"> 1. Технологія відновлення повинна бути відносно не дорогою 2. Відновлений вал має мати високу зносостійкість. 3. Висока якість відновлення та тривалий гарантійний термін служби валів

Кінцевим етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проєкту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) [6] на основі виділених ринкових загроз та можливостей. Інформацію вносимо до таблиці 4.4.

Перелік ринкових можливостей та ринкових загроз складається на основі аналізу факторів ризиків та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові можливості та загрози є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів –

фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо підвищення значущості цінового фактору при виборі товару чи послуги та відповідно цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.3 – SWOT- аналіз стартап-проєкту

<p>Сильні сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - вдосконалена технологія відновлення валів, якої немає в конкурентів; - збільшення ресурсу роботи валів; - зниження вібрації; - доступна ціна; - гарантійний сервіс 	<p>Слабкі сторони:</p> <ul style="list-style-type: none"> - відсутність досвіду виробництва; - маловідомість нашого виробництва; - потенційні конкуренти
<p>Можливості та перспективи розвитку:</p> <ul style="list-style-type: none"> - розширення географії потенційних клієнтів; - розширення номенклатури деталей; - співпраця із ЗСУ; - можливість використання маркетингу в соціальних мережах для просування реклами 	<p>Загрози, ризики:</p> <ul style="list-style-type: none"> - зниження доходів частини клієнтів; - поява інших конкурентів на внутрішньому ринку; - рівень безпеки регіону та виробничих потужностей

Висновки по четвертому розділу

В даному розділі розроблено та запропоновано старт-ап, щодо практичної реалізації бізнес ідеї на реальному виробництві з отриманням прибутку. Проведено спрощений ринковий аналіз можливостей впровадження проєкту та визначено потенційних клієнтів. Доцільне подальше впровадження даного проєкту.

ВИСНОВОК

У даній кваліфікаційній роботі магістра проведено аналіз можливих способів відновлення колінчастого валу з розглядом таких способів, як вібродугове наплавлення, наплавлення у вуглекислому газі, газополум'яне напилення, плазмове напилення, плазмове наплавлення. Як спосіб для побудови проектної технології обрана плазмове наплавлення. Цей спосіб відновлення володіє великим коефіцієнтом довговічності та мінімальною вартістю нанесення покриттів.

Вдосконалено технологічний процес відновлення колінчастого валу та спроектовано спеціальне обладнання для реалізації розробленого технологічного процесу. Це дозволило зробити такі висновки:

1. Розроблено технологічний процес відновлення валу із застосуванням плазмового нанесення покриття та встановлено оптимальні параметри режимів обробки.
2. Спроектовано спеціальне обладнання для реалізації проектної технології плазмового напилення колінчастого валу з визначенням різних матеріалів для наплавлення;
3. Виконано планування виробничої ділянки для плазмового напилення валів;
4. Спроектовано коробку швидкостей токарного верстату із використанням CAD-CAM-CAE систем для розширення технологічних можливостей спроектованого обладнання.
5. Розроблено start-up проект з відновлення валів та надано рекомендації для реального впровадження.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Overby, Alan. CNC Machining Handbook: Building, Programming, and Implementation /Overby A. – 1 th ed. – McGraw-Hill Education TAB, 2010. – 272 p.
2. Атаманюк В.В. Технологія конструкційних матеріалів. – Київ: Кондор, 2006. – 528 с.
3. Борозенець Г.М., Павлов В.М., Семак І. В. Деталі машин : Навчальний посібник. – К.: Видавничий дім «Кондор», 2021. – 220 с.
4. Гальчук Т.Н. Кваліфікаційна робота магістра. Методичні вказівки до оформлення кваліфікаційної роботи магістра для здобувачів другого (магістерського) рівня освітньо-професійної програми «Прикладна механіка» галузь знань 13 Механічна інженерія спеціальності 131 Прикладна механіка денної та заочної форм навчання. / Т.Н. Гальчук – Луцьк: Луцький НТУ, 2019. – 32с.
5. Дубовий О.М., Степанчук А.М. Технологія напилювання покриттів: Підручник. – Миколаїв: НУК, 2007. – 236 с.
6. Кривов, Г. О. Управління проектами у наукоємному машинобудуванні [Електронний ресурс] : навчальний посібник / Г. О. Кривов, К. О. Зворикін, С. Г. Кривова. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 224 с.
7. Кузнецов Ю.М. Технологічне оснащення для високоефективної обробки деталей на токарних верстатах/ Ю.М. Кузнецов, І.В. Луців, О.В. Шевченко, В.Н. Волошин – К.: - Тернопіль: Тернограф, 2011. – 692с.
8. Основи трибології. Підручник / А.М. Антипенко, О.М. Белас, В.А. Войтов та інші. За ред. В.А. Войтова. – Харків.: 2008. – 339 с.
9. Погребна Н.Е., Куцова В.З., Котова Т.В. Способи зміцнення металів: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – 89 с.
10. Полінкевич Р.М. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи із спеціальності 131 – Прикладна механіка, спеціалізації:

«Верстати з ЧПК та роботизовані комплекси» для студентів всіх форм навчання. / Р.М. Полінкевич, – Луцьк: Луцький НТУ, 2017. – 44 с.

11. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина II: Навч. посібник. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. – 38 с.

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

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

14. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство: підручник для вищих навчальних закладів III-IV рівнів акредитації / За ред. А.С. Опальчука. – Ніжин: ТОВ Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 792 с.

15. Харченко А.О. Верстати з ЧПУ та обладнання гнучких виробничих систем: Навчальний посібник для студентів вузів. – К.: ВД «Професіонал», 2004. – 304 с.

16. Четвержук Т.І. Статистичне моделювання технічних характеристик металорізальних верстатів./ Четвержук Т.І., Полінкевич Р.М., Редько Р.Г., Залета О.М., Скляр Р.А. Міжвузівський збірник «Наукові нотатки». Луцьк, 2021, №71. – С. 322-329.

17. Шиліна О.П., Осадчук А.Ю. Газотермічна обробка матеріалів. Лабораторний практикум. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 73 с.

18. Ющенко К.А., Борисов Ю. С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. Інженерія поверхні. Київ: Наукова думка, 2007. – 553 с.