

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»

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ
ВЕРСТАТА З ПОКРАЩЕНИМИ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ
МОЖЛИВОСТЯМИ ДЛЯ ОБРОБКИ ПРОФІЛЬНИХ
ПОВЕРХОНЬ

спеціальність 131 Прикладна механіка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Прикладна механіка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ІМм-21

Князєв Ярослав Ростиславович

(підпис)

Керівник:

к.т.н., доцент

Редько Ростислав Григорович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Четвержук Тарас Іванович

(підпис)

Луцьк – 2024 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет транспорту та механічної інженерії

Кафедра прикладної механіки та мехатроніки

Ступінь вищої освіти: магістр

Галузь знань: 13 Механічна інженерія

Спеціальність: 131 Прикладна механіка

Освітня програма: Прикладна механіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Р. Редько

“ _____ ” _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Князєв Ярослав Ростиславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи: Дослідження та розробка конструкції верстата з покращеними технологічними можливостями для обробки профільних поверхонь

Керівник роботи: Редько Ростислав Григорович, к.т.н., доцент, затверджені наказом закладу вищої освіти від «30» грудня 2023 р. № 452/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: 1.12.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: Робоче креслення деталі, базовий технологічний процес виготовлення деталі, річна програма випуску деталей 40000 шт., відгуки підприємств про роботу обладнання, результати аналізу конструктивних і функціональних особливостей верстата.

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

Анотація. Зміст. Вступ. 1. Аналіз завдання та обґрунтування напрямків роботи. 2. Інформаційно-патентні дослідження по темі роботи. 3. Технологічний розділ. 4. Конструкторський розділ. 5. Науково-дослідний розділ. Висновки і пропозиції. Список використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

1. Оптимізація схем формоутворення – 1 ф.А1; 2. Схеми обробки профільних поверхонь - 1 ф.А1. 3. Аналіз методів обробки внутрішніх профільних отворів - 1 ф.А1. 4. Оптимізація компоновочних схем верстата - 1 ф.А1; 5. Структурно-кінематична та кінематична схеми верстата – 1 ф. А1; 6. Інструментальний шпindel – 1ф.А1; 7. Шпindelний вузол – 1 ф. А1.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання

03.09.2024 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи магістра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Аналіз завдання та обґрунтування напрямків роботи</i>	<i>15.09.24</i>	
2.	<i>Інформаційно-патентні дослідження по темі роботи</i>	<i>05.10.24</i>	
3.	<i>Технологічна частина</i>	<i>25.10.24</i>	
4.	<i>Конструкторська частина</i>	<i>10.11.24</i>	
5.	<i>Науково-дослідна частина</i>	<i>15.11.24</i>	
6.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>20.11.24</i>	
7.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>25.11.24</i>	
8.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи магістра до захисту</i>	<i>01.12.24</i>	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Князєв Я.Р.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

_____ (підпис)

Редько Р.Г.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Князєв Я.Р. Дослідження та розробка конструкції верстата з покращеними технологічними можливостями для обробки профільних поверхонь. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається із вступу, 5 розділів, висновків і пропозицій, списку використаних джерел і додатків.

Об'єктом дослідження кваліфікаційної роботи є спеціальний шліфувальний верстат для обробки внутрішніх полігональних поверхонь. Предмет дослідження – вузли верстатів, які забезпечують обробку полігональних поверхонь. Метою роботи є оцінка стану розвитку способів і засобів обробки полігональних поверхонь та розробка нових конструкцій верстатів з покращеними технологічними можливостями.

В кваліфікаційній роботі проведено аналіз області використання профільних поверхонь; виконано аналіз існуючих способів формоутворення профільних поверхонь; виконано технологічні розрахунки для типової деталі, що містить профільні поверхні; спроектовано та розроблено компоновку верстата для обробки профільних поверхонь; виконано розробку основних виконавчих вузлів запропонованого верстата та дослідження геометричних та кінематичних характеристик способу обробки полігональних отворів.

Ключові слова: технологічне обладнання, верстат, компоновки верстата, заготовка, деталь, гранчасті поверхні, режими різання, формоутворюючі рухи.

ABSTRACT

Knyazev Y.R. Research and development of a machine design with improved technological capabilities for processing profiled surfaces. Manuscript.

Master's qualification work of OP "Applied Mechanics" specialty 131 Applied Mechanics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

The master's thesis consists of an introduction, 5 chapters, conclusions and proposals, a list of used sources and appendices.

The object of the qualification work research is a special grinding machine for processing internal polygonal surfaces. The subject of the study is machine tool assemblies that provide processing of polygonal surfaces. The purpose of the work is to assess the state of development of methods and means of processing polygonal surfaces and to develop new designs of machines with improved technological capabilities.

In the qualification work, an analysis of the area of use of profiled surfaces was carried out; the analysis of existing methods of shaping profile surfaces was performed; technological calculations were performed for a typical part containing profiled surfaces; designed and developed the layout of the machine for processing profile surfaces; the development of the main executive units of the proposed machine and the study of the geometric and kinematic characteristics of the method of processing polygonal holes were carried out.

Key words: technological equipment, machine, machine layouts, workpiece, part, faceted surfaces, cutting modes, forming movements.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
Розділ 1. Аналіз завдання та обґрунтування напрямків роботи	11
1.1. Аналіз конструкторсько-технологічних особливостей деталі-представника	11
1.1.1 Службове призначення деталі	11
1.1.2 Аналіз деталі на технологічність	13
1.1.3 Сучасні досягнення в технології, обладнанні та оснащенні при виготовленні аналогічних деталей	14
1.2 Аналіз схем формоутворення необхідних для обробки деталі	15
1.3 Аналіз досліджень в області обробки полігональних поверхонь	21
1.4 Геометричні параметри, які характеризують профільні (контурні) криві	27
1.5 Аналітичні залежності полігональних поверхонь	28
1.6 Мета і задачі досліджень	30
Розділ 2 Інформаційно-патентні дослідження по обробці профільних поверхонь	31
2.1 Визначення та елементи класифікацій полігональних поверхонь	31
2.2 Аналіз області застосування профільних полігональних поверхонь	34
2.2.1 Використання профільних полігональних поверхонь для з'єднань вузлів та механізмів	35
2.2.2 Використання профільних полігональних поверхонь в якості носіїв інформації	40
2.2.3 Використання профільних полігональних поверхонь для передачі обертального руху	42
2.2.4 Використання профільних полігональних поверхонь в об'ємних машинах	44
2.2.5 Використання профільних полігональних поверхонь	

в затискних механізмах	46
Розділ 3. Технологічна частина	47
3.1 Вибір методів отримання заготовки	47
3.2 Вибір схеми базування	48
3.3 Вибір оптимального технологічного маршруту механічної обробки деталі–представника	50
3.4 Призначення припусків та міжопераційних розмірів	52
3.5 Розрахунок режимів різання	56
Розділ 4. Конструкторський розрахунок	60
4.1 Оптимізація компоновочної схеми проектованого верстата	60
4.1.1 Обґрунтування модуля верстата (МК, ТМ, КМ)	60
4.1.2 Побудова загальної матриці компоновки верстата	60
4.1.3 Вибір верстатів – аналогів	62
4.1.4 Вибір оптимальної схеми компоновки	65
4.2 Розробка структурно-кінематичної та кінематичної схем верстата	67
4.3 Розробка та розрахунок конструкції приводу інструментального шпинделя	69
4.3.1 Кінематика приводу	69
4.3.2 Вибір електродвигуна приводу інструментального шпинделя	70
4.3.3 Автоматизований розрахунок зубчасто-пасової передачі приводу інструментального шпинделя	71
4.4 Розробка конструкції приводу закріплення заготовки	71
4.4.1 Кінематика приводу	71
4.4.2 Вибір електродвигуна приводу головного руху	72
4.4.3 Розрахунок зубчасто-пасової передачі	72
4.5 Розрахунок тягового пристрою приводу подач	75

4.6 Конструювання та розрахунок шпindelного вузла для заготовки	76
Розділ 5. Науково-дослідна частина	78
ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ	83
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	85
ДОДАТКИ	88

ВСТУП

Машинобудування значною мірою визначає обсяг і темпи науково-технічного прогресу. Подальші його успіхи залежать від того, наскільки повною мірою будуть використані і розвинуті можливості, якими технологія машинобудування володіє.

Полігональні поверхні почали застосовувати в машинобудуванні порівняно недавно, а тому галузей їх використання відносно небагато. Здебільшого вони використовуються в профільних з'єднаннях різних деталей машин, які є надійною альтернативою традиційним шпонковим, шліцевим та іншим з'єднанням для передачі крутного моменту. Полігональні поверхні також знаходять своє застосування в об'ємних машинах, затискних пристроях, багатоклинових радіальних підшипниках ковзання тощо. Однак, вони не набули переважного поширення внаслідок невідпрацьованості ефективних способів їх обробки. Особливо це стосується обробки глухих полігональних отворів.

Профільні з'єднання володіють більш високим ККД, ніж шпонкові і шліцеві, що призводить до зменшення витрати енергії при здійсненні роботи при передачі крутного моменту.

Полігональні поверхні невисокої точності зазвичай обробляють методами пластичного деформування. Обробку способом різання доцільніше проводити в таких випадках: матеріал заготовки не підлягає або погано піддається обробці методами пластичного деформування; виготовлення штампів є економічно недоцільним; полігональний отвір має відносно велику глибину; полігональний отвір розташований в тонкостінній деталі, зовнішня поверхня якої помітно деформується; є підвищеними вимоги щодо точності полігональної поверхні.

Незважаючи на досить велику кількість робіт в галузі дослідження обробки різанням полігональних поверхонь, значна їх більшість присвячена дослідженню кінематики при обробці зовнішніх полігональних поверхонь.

Саме тому тема «Дослідження та розробка конструкції верстата з покращеними технологічними можливостями для обробки профільних поверхонь» є актуальною.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є оцінка стану розвитку способів і засобів обробки полігональних поверхонь та розробка нових конструкцій верстатів з покращеними технологічними можливостями.

Для досягнення мети потрібно вирішити такі основні задачі:

- провести аналіз використання профільних поверхонь;
- провести аналіз існуючих способів формоутворення профільних поверхонь;
- провести технологічні розрахунки типової деталі, що містить профільні поверхні;
- спроектувати та розробити компоновку верстата з обробки профільних поверхонь;
- провести розробку основних виконавчих вузлів запропонованого верстата;
- провести дослідження геометрично-кінематичних характеристик способу обробки полігональних отворів.

Об'єкт дослідження – спеціальний шліфувальний верстат для обробки внутрішніх полігональних поверхонь.

Предмет дослідження – вузли верстатів, що забезпечують обробку полігональних поверхонь.

Методи дослідження. Системний підхід, як метод дослідження, дозволяє в роботі представити об'єкт як єдине ціле. Методи математичного аналізу дозволили здійснити дослідження кінематики процесу обробки профільних з'єднань.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ЗАВДАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ НАПРЯМКІВ РОБОТИ

1.1. Аналіз конструкторсько-технологічних особливостей деталі-представника

1.1.1. Службове призначення деталі.

В кваліфікаційній роботі розглядається комплексна деталь, яка являє собою умовний корпус муфти, що об'єднує набір різноманітних внутрішніх некруглих поверхонь (РК-профіль). Дані деталі широко використовуються у сучасному виробництві.

Профільні з'єднання використовуються переважно у силових механізмах для передачі значного крутного моменту, а також і в кінематичних для точної передачі обертового руху за відносно невеликих значень крутного моменту, а також у реверсивних механізмах. Профільні з'єднання існують з випуклими, прямими й ввігнутими гранями.

Надійність роботи, передачі крутного моменту, а також компактність вимагає матеріал, з якого вона виготовлена – це Сталь 45 ГОСТ 1050-74.

В таблицях 1.1 і 1.2 наведені дані про матеріал [1].

Таблиця 1.1. – Хімічний склад Сталі 45

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	S, %	P, %	Cu, %	Ni, %	As, %
			не більше					
0.42-0.50	0.17-0.37	0.50-0.80	0.25	0.04	0.035	0.25	0.25	0.08

Таблиця 1.2. – Механічні властивості Сталі 45

σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	ψ , %	a_H , кгс/см ²	НВ
не менше					
350	600	16	40	55	217

На рисунку 1.1 наведено типову деталь, яку ми будемо виготовляти на проєктованому верстаті. Максимальна довжина оброблювальної деталі складає: $L = 165$ мм, а максимальний діаметр: $d = 90$. Деталь складається із таких поверхонь: циліндричних та конічної поверхні.

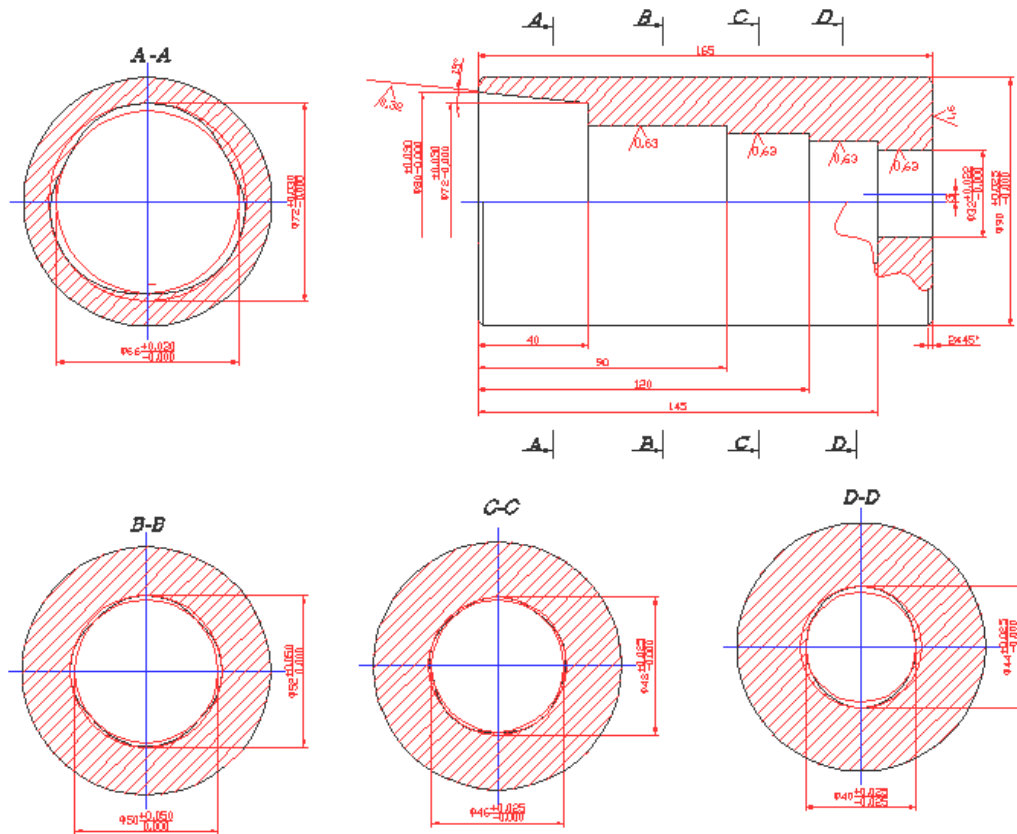


Рисунок 1.1 Типова деталь

Деталь піддають таким видам обробки, як свердління, точіння, шліфування. Поверхні деталі утворюють тіло з циліндричною формою, з складними внутрішніми поверхнями.

Середня точність розмірів поверхонь по 8-9 квалітету точності, шорсткість поверхонь – $Ra=0,63-1,6$. Спосіб отримання заготовок дає можливість виготовляти заготовки максимально наближені до розмірів і форми готової деталі.

Деталь також піддають термічній обробці для забезпечення твердості HRC7 – 42 ± 52 . Тому після викінчувальної операції деталь піддається загартуванню.

Метод одержання заготовки дозволяє вибрати такі припуски, щоб подальша обробка лезовим інструментом була найбільш ефективною. При обробці даної деталі будемо використовувати метод суміщення баз – конструкторської і технологічної.

1.1.2. Аналіз деталі на технологічність.

Рівень технологічності деталі визначається за трьома показниками: точністю деталі, шорсткістю поверхні деталі, по використанню матеріалу.

Рівень технологічності деталі за точністю обробки визначаємо по формулі [2, с. 33].

$$K_{mч} = 1 - \frac{1}{T_{cp}} = 1 - \frac{\sum n_i}{\sum Tn_i}, \text{ де} \quad (1.1)$$

$$T_{cp} = \frac{\sum Tn_i}{n_i} = \frac{n_1 + 2n_2 + \dots + m \cdot n_m}{n_1 + n_2 + \dots + n_m}, \text{ де} \quad (1.2)$$

T – клас точності обробки, n – число розмірів відповідного класу.

Базовий коефіцієнт по точності обробки:

$$K_{mч.б} = 1 - \frac{1+1+10}{9 \cdot 1 + 12 \cdot 1 + 11 \cdot 10} = 0.908$$

Проектний варіант по коефіцієнту точності обробки:

$$K_{mч} = 1 - \frac{1+1+10}{8 \cdot 1 + 12 \cdot 1 + 11 \cdot 10} = 0.91$$

Рівень технологічності визначається за формулою [3, с. 33].

$$K_{y.mч} = \frac{K_{mч.б}}{K_{mч}}, \quad (1.3)$$

$$K_{y.mч} = \frac{0.908}{0.91}$$

Рівень технологічності за шорсткістю поверхонь визначаємо за формулою [2, с. 34].

$$K_{цш} = \frac{K_{шб}}{K_{ш}}, \text{ де} \quad (1.4)$$

$K_{шб}$ – базовий коефіцієнт шорсткості;

$K_{ш}$ – проектний коефіцієнт шорсткості.

$$K_{ш} = 1 - \frac{1}{Ш_{сп}} = 1 - \frac{\sum n_i m}{\sum Ш n_i m} = 1 - \frac{n_1 + n_2 + \dots + n_{14}}{n_1 + 2n_2 + \dots + 14n_{14}}, \text{ де} \quad (1.5)$$

Ш – клас шорсткості деталі;

n – кількість поверхонь відповідної шорсткості.

Базовий коефіцієнт шорсткості дорівнює:

$$K_{шб} = 1 - \frac{1+1+10}{3 \cdot 1 + 6 \cdot 1 + 4 \cdot 10} = 0.75$$

Проектний коефіцієнт шорсткості дорівнює:

$$K_{шп} = 1 - \frac{1+1+10}{3 \cdot 1 + 5 \cdot 1 + 4 \cdot 10} = 0.755$$

Рівень технологічності по шорсткості дорівнює:

$$K_{шш} = \frac{0.75}{0.755} = 0.99$$

Рівень технологічності деталі за використанням матеріалу визначаємо по формулі [2, с. 34].

$$K_{ам} = \frac{M_d}{M_з}, \text{ де} \quad (1.6)$$

M_d – маса виготовленої деталі;

$M_з$ – маса заготовки.

$M_d = 5,26$ кг;

$M_з = 5,5$ кг.

$$K_{ам} = \frac{M_d}{M_з} = \frac{5.26}{5.5} = 0.96$$

Тому вважаємо, що деталь є технологічною.

1.1.3 Сучасні досягнення в технології, обладнанні та оснащенні при виготовленні аналогічних деталей.

У розвитку технології обробки матеріалів різанням за останні роки відбулися значні зміни. Інтенсифікація технологічних процесів шляхом застосування різальних інструментів, виготовлених з нових інструментальних матеріалів, збільшення області застосування верстатів з ЧПК, використання роботизованих технологічних комплексів при підвищенні геометричної

точності, що досягається при обробці - це неповний перелік важливих напрямків розвитку в технології механічної обробки машинобудування.

Виробництво безшпонкових з'єднань (до яких відносять і профільні) може бути організоване за наявності відповідного обладнання з обробки профільних поверхонь у деталях з'єднання. Створення нових спеціалізованих верстатів завжди було трудомісткою і тривалою справою, тому на початковому етапі проектування і виготовлення безшпонкових з'єднань для виробництва пішли на модернізацію універсальних верстатів, яка зводилась до оснащення їх нескладним пристроєм для кінематичного процесу різання профільних поверхонь.

Але при цьому дане обладнання проблемно швидко переналагодити на випуск нової продукції. Тому в даний час все більше знаходить використання високопродуктивне обладнання з ЧПК, а також багатоцільових верстатів і оброблювальних центрів.

Вищезгадане обладнання дозволяє механізувати, а також автоматизувати самі трудомісткі процеси, де всі операції (від завантаження заготовки в обладнання до отримання готової деталі) є повністю автоматизовані, при цьому виготовлена деталь отримує вищі технологічні якості, так як обладнання містить як активний контроль, так і підналагодження інструменту та режимів різання на конкретний розмір. Все це дає можливість перейти на прогресивнішу і сучаснішу технологію металообробного виробництва.

1.2. Аналіз схем формоутворення, необхідних для обробки деталі

Поверхні деталей, що обробляються, можна розглядати як безперервну безліч послідовних положень (слідів) рухомих відтворюючих ліній, одна з яких називається твірною, а інша є відтворюючою лінією, що називається напрямною. Відтворюючі лінії на верстатах утворюються матеріальними точками і лініями різальних кромek інструмента за рахунок відносних рухів інструменту і заготовки [3].

Під час обробки твірні лінії відтворюються комбінацією узгоджених між собою обертових та прямолінійних переміщень заготовки та інструмента. Рухи, які необхідні для цього, називають формоутворюючими робочими рухами. Вони можуть бути простими і відображаються одним рухом $\Phi v(O_1)$, а також можуть бути складними, коли узгоджено два або декілька рухів, завдяки яким утворюється поверхня: $\Phi v(O_1, P_2)$; $\Phi s(P_3, P_4)$.

Більшість поверхонь деталей машин можуть утворюватись при використанні в якості твірних ліній: прямої, кола, гвинтової лінії і інших. Циліндричні поверхні можуть бути отримані за переміщення твірної – прямої 1 по напрямній – колу 2, або за руху утворюючого кола 3 вздовж напрямної – прямої лінії 4.

Залежно від виду ріжучого інструменту і форми ріжучої частини існує чотири методи формоутворення: копіювання, сліду, дотику та обкату.

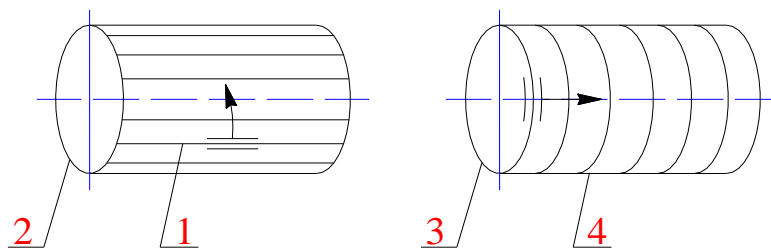


Рисунок 1.2 Схеми утворення циліндричної поверхні

Будемо розглядати методи утворення відтворюючої лінії на токарно-патронно-центровому верстаті, які використовуються при виготовленні.

Метод сліду складається з того, що твірна лінія отримується як слід руху точки – вершини різця. Наприклад, при точінні різцем твірна 1 (рис. 1.3) з'являється як слід точки А (вершини різця). Інструмент і заготовка переміщається відносно один одного так, що вершина А ріжучого інструмента весь час дотикається до відтворюючої лінії 1. Напряму лінію одержують в результаті обертання тіла заготовки. В цьому випадку потрібні два формоутворюючих рухи: обертання заготовки $\Phi v(O_1)$ та подача інструмента $\Phi s(P_2)$.

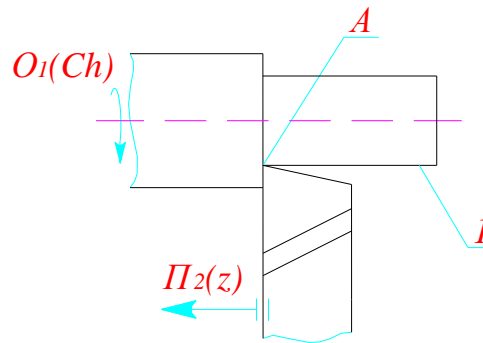


Рисунок 1.3 Утворення твірної лінії методом сліду

Метод копіювання полягає в тому, що різуча кромка інструменту по формі співпадає з твірною лінією. Наприклад, при одержанні канавки (рис. 1.4 а) твірна 1 утворюється шляхом копіювання прямолінійної кромки інструменту, а рух різання 2 – обертання заготовки.

Для зняття припуску і отримання деталі із заданими розмірами необхідне переміщення різця, але даний рух є рухом врізання V_r (P_2). При різанні різцем застосовується метод копіювання (рис. 1.4 б)), рух P_3 є установчим.

Уст (P_3). Φv (O_1, P_2) – це складний рух, де узгоджено обертання заготовки при подачі інструменту, яка відповідає кроку різі.

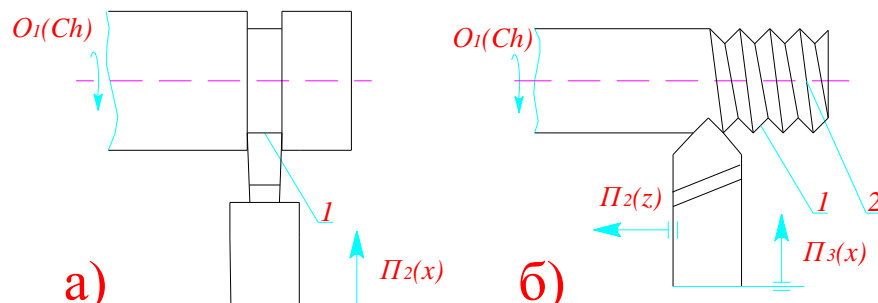


Рисунок 1.4 Утворення твірних ліній методом копіювання

Ланки, що несуть заготовку і інструмент, називаються робочими або виконавчими. В процесі обробки здійснюються узгоджені рухи, які поділяються на формоутворюючі, установчі, ділильні, врізання, допоміжні та керуючі.

Рух заготовки і інструмента при різанні прийнято поділяти відповідно на головний рух і рух подачі.

Головний рух – рух, що забезпечує зняття стружки із заготовки зі швидкістю різання - Φv (O_1).

Рух подачі – рух, що дозволяє підвести під ріжучу кромку інструмента нові зони заготовки і забезпечити зняття шару матеріалу - Φ_s (Π_2).

В розглядуваному верстаті головний рух (обертвий) Φ_v (O_1) має заготовка, а рух подачі Φ_s (O_2 , Π_3) – прямолінійний, або складний, виконує інструмент.

Переміщення інструмента проходить переважно по прямій лінії, за допомогою поздовжньої подачі інструмента – Φ_{s1} (Π_2), або перпендикулярно з поперечною подачею інструмента Φ_{s2} (Π_3). В деяких випадках (точіння конусних, поверхонь) для формоутворення потрібна комбінація обох подач.

При обробці комплексних деталей здійснюються наступні операції: формоутворення плоских поверхонь (підрізання торця) (рис. 1.5); формоутворення конічних поверхонь (точіння внутрішньої конусної поверхні) (рис. 1.6.); точіння внутрішньої циліндричної поверхні (рис. 1.7.); шліфування торців деталі (рис. 1.8); шліфування профільних конусних отворів (рис. 1.9); шліфування профільного отвору (рис. 1.10).

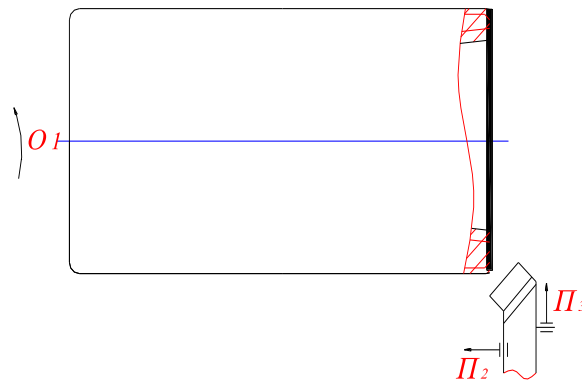


Рисунок 1.5 Формоутворення плоскої поверхні (підрізання торця)

Таблиця 1.3. – Формоутворення плоскої поверхні

Формоутворюючі лінії	Тип ліній	Метод формоутворення	Формоутворюючі рухи
твірна	пряма	сліду	Φ_s (Π_3)
напрямна	коло	сліду	Φ_v (O_1)

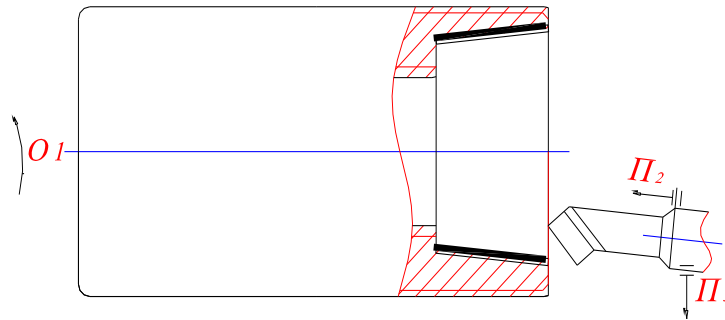


Рисунок 1.6 Формоутворення конічної поверхні (точіння конуса)

Таблиця 1.4. – Формоутворення конічної поверхні

Формоутворюючі лінії	Тип ліній	Метод формоутворення	Формоутворюючі рухи
твірна	пряма	сліду	$\Phi_v(O_1)$
напрямна	коло	сліду	$\Phi_s(\Pi_2)$

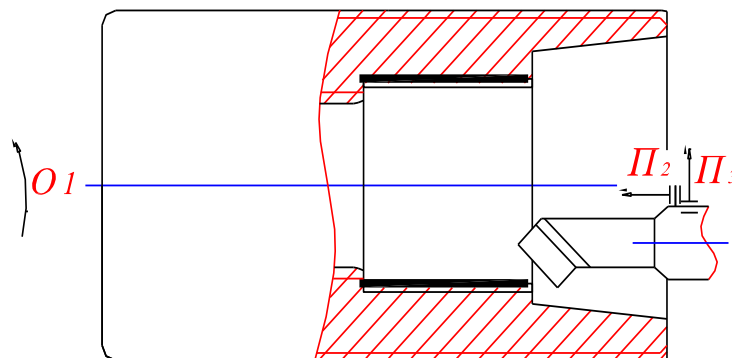


Рисунок 1.7 Формоутворення внутрішньої циліндричної поверхні (розточування отвору)

Таблиця 1.5. – Формоутворення циліндричної поверхні

Формоутворюючі лінії	Тип ліній	Метод формоутворення	Формоутворюючі рухи
твірна	пряма	сліду	$\Phi_v(O_1)$
напрямна	коло	сліду	$\Phi_s(\Pi_3)$

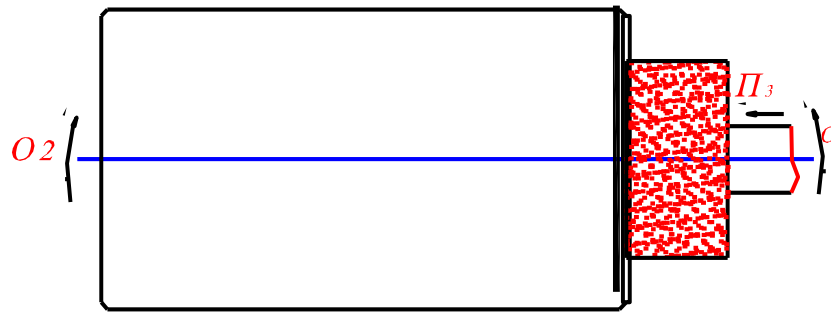


Рисунок 1.8 Формоутворення плоскої поверхні (шліфування торця)

Таблиця 1.6. – Формоутворення плоскої поверхні

Формоутворюючі лінії	Тип ліній	Метод формоутворення	Формоутворюючі рухи
твірна	пряма	сліду	$\Phi v(O_1)$
напрямна	коло	дотику	$\Phi v(O_1)$ $\Phi s(O_2)$

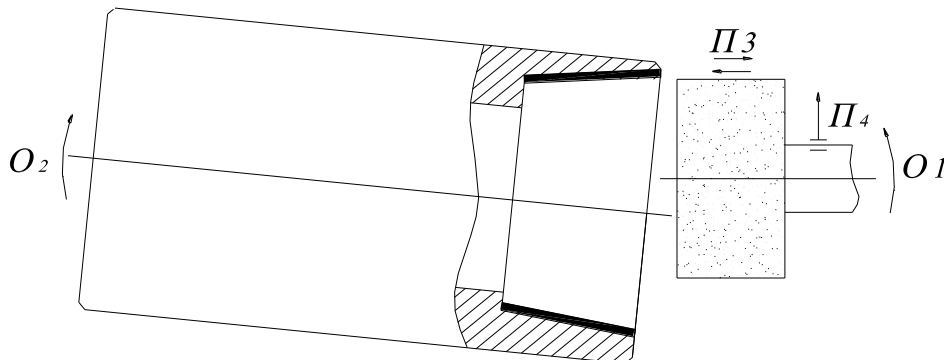


Рисунок 1.9 Формоутворення профільного конусного отвору

Таблиця 1.7. – Формоутворення профільного конусного отвору

Формоутворюючі лінії	Тип ліній	Метод формоутворення	Формоутворюючі рухи
твірна	пряма	дотику	$\Phi v(O_1)$ $\Phi s(O_2 P_4)$
напрямна	коло	дотику	$\Phi v(O_1)$ $\Phi s(P_3)$

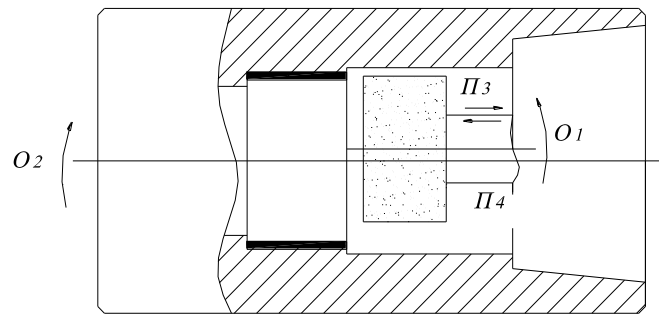


Рисунок 1.10 Формоутворення профільного циліндричного отвору

Таблиця 1.8. – Формоутворення профільного циліндричного отвору

Формоутворюючі лінії	Тип ліній	Метод формоутворення	Формоутворюючі рухи
твірна	пряма	дотику	$\Phi_V(O_1)$ $\Phi_S(O_2\Pi_4)$
напрямна	коло	дотику	$\Phi_V(O_1)$ $\Phi_S(\Pi_3)$

1.3. Аналіз досліджень в області обробки полігональних поверхонь

На даний час в цій області в тій чи іншій мірі проведено декілька досліджень як способів обробки полігональних поверхонь, так і пристроїв для їх реалізації.

Запропонована більшість робіт стосується лише кінематики процесу при обробці на різних групах верстатів.

Так, робота Даниленка О.В. [4] характеризується вирішенням ряду задач, серед яких присутній кінематичний аналіз способів формоутворення полігональних поверхонь, та розробка верстатних пристосувань для їх забезпечення.

Даниленком О.В. виконано кінематичний аналіз способів формоутворення полігональних поверхонь та полігональних поверхонь з більшим відношенням довжини контура до його ширини, які можуть мати криволінійні ділянки.

Формоутворення однієї грані багатогранного контура виконується при кожному оберті інструмента, наприклад різцевої головки одним різцем. За умови, що за час повного оберту заготовки інструмент здійснить стільки повних обертів, скільки граней містить багатогранник, формоутворення контура буде здійснене повністю. В цьому випадку будуть послідовно оброблятися сусідні грані. При зменшенні частоти обертання інструмента вдвічі, одержимо співвідношення, за якого чергова оброблювана грань буде розташована через одну від попередньої, і так далі. Таким чином, передатне відношення, що забезпечує ділення контуру на певну кількість граней, можна навести у вигляді залежності:

$$K_{\omega} = \frac{N}{K} = \frac{\omega_u}{\omega_z} \quad (1.7)$$

де N - кількість граней багатогранника; K - ціле число, що показує, яка по порядку після оброблюваної грані буде оброблюватись наступною; ω_u - кутова швидкість інструменту; ω_z - кутова швидкість заготовки.

Але слід враховувати, що при обробці багатогранників, число граней яких не виражається простим числом, при формоутворенні усіх граней багатогранника одним інструментом може здійснюватись не за всіх передаточних відношень. Мінімально необхідна для обробки заданого багатогранника кількість інструментів може визначатись залежністю:

$$N \geq N_u = |K - N_j|_{\min} \gg 1 \quad (1.8)$$

N_u – мінімальна та необхідна для формоутворення заданого багатогранника кількість інструментів; $j = 0, 1, 2, 3, \dots$

Формоутворення багатогранників з гранями, що подібні до прямолінійних, потребує забезпечення не тільки відповідних кінематичних, але і геометричних співвідношень. В цьому випадку обмеженням є продуктивність процесу. З урахуванням цих вимог в роботі [4] виконано аналіз схем формоутворення. Для прикладу розглянемо схему, наведену на рис. 1.11.

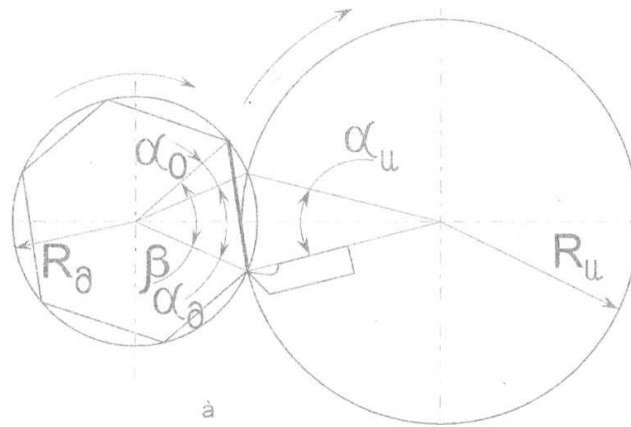


Рисунок 1.11 Схема формоутворення багатогранника одним різцем

Для цієї схеми швидкість різання буде визначатись як сума швидкостей поверхні оброблюваної деталі та ріжучої кромки інструмента:

$$V = V_u + V_z \quad (1.9)$$

Де: V - швидкість різання при обробці грані; V_u - швидкість поверхні оброблювальної грані; V_z - швидкість ріжучої кромки інструменту.

Підставивши параметри, що використовуються при розрахунку режимів різання, та враховуючи, що $r = R_a \cdot \cos\left(\frac{\pi}{N}\right)$, отримаємо:

$$R_u = \frac{1}{K} \cdot \left(\frac{500 \cdot V}{\pi \cdot n_z} + R_a \cdot \cos\left(\frac{\pi}{N}\right) \right) \quad (1.10)$$

де r - радіус вписаного в багатогранник кола; R_u - радіус розміщення ріжучих кромки інструмента; n_z - частота обертання заготовки; R_a - радіус кола, що описане навколо багатогранника. Дана залежність дозволяє визначити радіус розміщення ріжучих кромки в інструменті за заданої частоти обертання заготовки та відомій нормативній швидкості різання для вибраного інструменту.

Потрібні геометричні залежності визначаються за умови, що ріжуча кромка проходить через крайні точки грані, а по середині відстань між заданим профілем грані та ріжучою кромкою не перевищує заданої величини. Враховуючи дану умову відстань між осями обертання заготовки та інструменту повинна відповідати залежності:

$$L = r + R_H + H \quad (1.11)$$

де L - відстань між осями; H - відстань, яка допускається між заданим та відтворюваним контуром у середньому перетині грані, а проходження ріжучої кромки через крайні точки грані забезпечується, якщо поворот на кути, необхідні для формоутворення грані, буде виконуватись заготовкою та інструментом за однаковий час, тобто:

$$\alpha_0 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{N - \alpha_3} = \frac{\alpha_u}{\omega_u} \quad (1.12)$$

Звідси зважаючи, що $\omega_M = K_\omega \cdot \omega_3$, одержимо: $\alpha_0 = \frac{\alpha_u}{K_\omega}$, з іншого боку $\alpha_0 = \frac{2 \cdot \pi}{N - \alpha_3}$, тоді прирівнюючи праві частини будемо мати:

$$\alpha_u = K_\omega \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{N - \alpha_3} \right), \quad (1.13)$$

де α_0 – кут повороту заготовки під час обробки однієї грані; α_u - кут повороту інструменту під час обробки однієї грані.

Враховуючи вищенаведені залежності умови контакту ріжучої кромки з крайніми точками теоретичного профілю грані (коли є кінематичні та геометричні умови здійснення способу формоутворення) можуть бути представлені рівняннями:

$$\alpha_u = K_\omega \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi}{N} - \alpha_3 \right) \quad (1.14)$$

$$L = R_u + R_3 \cdot \cos \frac{\pi}{N} + H \quad (1.15)$$

$$R_3 \cdot \left[\cos \frac{\pi}{N} - \cos \left(\frac{\alpha_3}{2} \right) \right] \cdot R_u \cdot \left[1 - \cos \left(\frac{\alpha_u}{2} \right) \right] + H = 0 \quad (1.16)$$

$$R_3 \cdot \sin \left(\frac{\alpha_3}{2} \right) - R_u \cdot \sin \left(\frac{\alpha_u}{2} \right) + H = 0 \quad (1.17)$$

$$R_u = \frac{\left(\frac{500 \cdot V}{\frac{\pi}{n_3}} + R_3 \cdot \cos \frac{\pi}{N} \right)}{K_\omega} \quad (1.18)$$

Аналогічно можуть бути одержані залежності і для інших схем. Такі системи рівнянь можуть визначити п'ять взаємозалежних параметрів (K_ω , R_u , L , α_u , α_3), що описують спосіб формоутворення і можуть застосовуватись як вихідні дані при проектуванні пристроїв для різних верстатів.

Також в роботі виконано математичне моделювання та експериментальні дослідження з динамічними похибками обробки. Автором розроблено низку нових способів і технічних рішень вузлів для можливості формоутворення регулярних полігональних поверхонь, в т.ч. поверхонь з криволінійними ділянками.

До переваг роботи можна віднести розроблення практичних рекомендацій з вибору параметрів обладнання для обробки полігональних поверхонь. Запропоновані і захищені авторським правом нові способи формоутворення та нові конструкції обладнання для обробки полігональних поверхонь.

В роботах Данилова В.А. [5, 6] розвиток теорії формоутворення поверхонь різанням в галузі синтезу схем формоутворення складних поверхонь. Розкритий взаємозв'язок геометричних та часових моделей формоутворення поверхонь, також встановлені складні методи генерації твірних ліній як база синтезу комбінованих технологічних методів обробки. Показано зв'язок продуктивності формоутворення і точності профілювання поверхні і просторово-часових параметрів схем формоутворення, в основі якої лежать критерії та їх кількісні характеристики для оцінки ефективності загальних схем при обробці при повному та частковому формоутворенні поверхні, що враховують цикловий характер процесів обробки складних поверхонь.

Слід відмітити, також, розробку автором основ синтезу раціональної кінематики формоутворення складних поверхонь при різанні, які включають оптимізацію запропонованими методами структури і параметрів виконавчих рухів на основі їх впливу на продуктивність і точність процесу формоутворення і складність кінематики верстата. Це дозволило створити більш прогресивні схеми обробки широкого класу поверхонь.

Роботи Кальченко В.І. [7] присвячені процесу шліфування полігональних поверхонь і можуть використовуватись при аналізі кінематики точності формоутворення полігональних поверхонь.

Питання синтезу прецизійних механізмів при обробці криволінійних поверхонь, а також питання кінематики точності процесу і обробки розглянуті в роботах Куліка В.К. [8, 9].

В роботі Максимова Й.Т. і Анчева А.П., що з технічного університету м. Габрово [10], розглянуті проблеми при моделюванні профільних з'єднань методом кінцевих елементів. Також ними розглянуті нові способи обробки полігональних поверхонь і вплив їх особливостей на властивості утворюваних ними профільних з'єднань.

Робота Алексієва С.Л. [10] стосується дослідженню способу обробки полігональних отворів за допомогою комбінування обертальних рухів навколо паралельних осей. Ним теоретично обґрунтовано і розроблено метод з обробки гіпоциклоїдальних отворів за комбінації обертальних рухів інструменту і заготовки навколо паралельних осей. Ним також досліджено силові залежності процесу. В роботі були визначені геометричні параметри різальної частини інструменту та виведені умови його роботи з додатним значенням заднього кута. Фінішна обробка полігональних отворів вільним абразивом розглянута в роботі [12].

Ряд робіт присвячені переважно питанням кінематики процесу формоутворення полігональних поверхонь.

Найбільш широко і повно питання кінематики процесів обробки складних поверхонь, в тому числі й полігональних, розкрито в роботах [13-14]. Також тут показані типові приклади застосування полігональних поверхонь.

В роботі Вачева А.А. [15] також розглянуто синтез і аналіз схем обробки складних поверхонь при використанні комбінації обертальних рухів заготовки та інструменту.

Роботи Тимченко О.І. та інших фахівців Станкіну [16-18] присвячені аналізу та синтезу схем обробки полігональних поверхонь за використання різних методів. Досліджено, також, кінематику процесу довбання полігональних отворів. Також висвітлені задачі профілювання протяжок для

обробки некруглих отворів. На основі даних досліджень виконано цілий ряд винаходів, наприклад [19, 20].

Також значний інтерес являє собою питання точного позиціонування робочих органів верстата, де здійснюється обробка полігональної поверхні. Важливим є точна установка відстані між осями інструменту та заготовки при реалізації досліджуваних способів [21].

В роботі Самойленко О.В. були розглянуті способи вдосконалення токарних верстатів для обробки полігональних поверхонь за методом кінематичного налагодження [22].

Заслуговує на увагу одна із робіт в даній області – праця науковців НТУУ «КПІ», яка присвячена теоретичним та практичним аспектам обробки полігональних поверхонь [13].

1.4. Геометричні параметри, які характеризують профільні (контурні) криві

Контурні криві профільних з'єднань із синусоїдальними (синоїдними), циклоїдними, рівновісними та іншими контурами із неперервними і перервними (зрізаними по вершинах) кривими характеризуються такими геометричними параметрами (рис. 1.12 а, б):

	Вал (рис. 1.12 а)	Отвір (рис 1.12 б)
Діаметр вписаного кола	d_1	d_2
Діаметр середнього кола (R – радіус середнього кола)	$D = 2 \cdot R$	$D = 2 \cdot R$
Діаметр описаного кола	D_1	D_2
Діаметр зрізаного кола	D_{1c}	D_{2c}
Ексцентриситет профіля	e	e
Радіус-вектор профіля	ρ	ρ
Кутовий параметр профіля	φ	φ

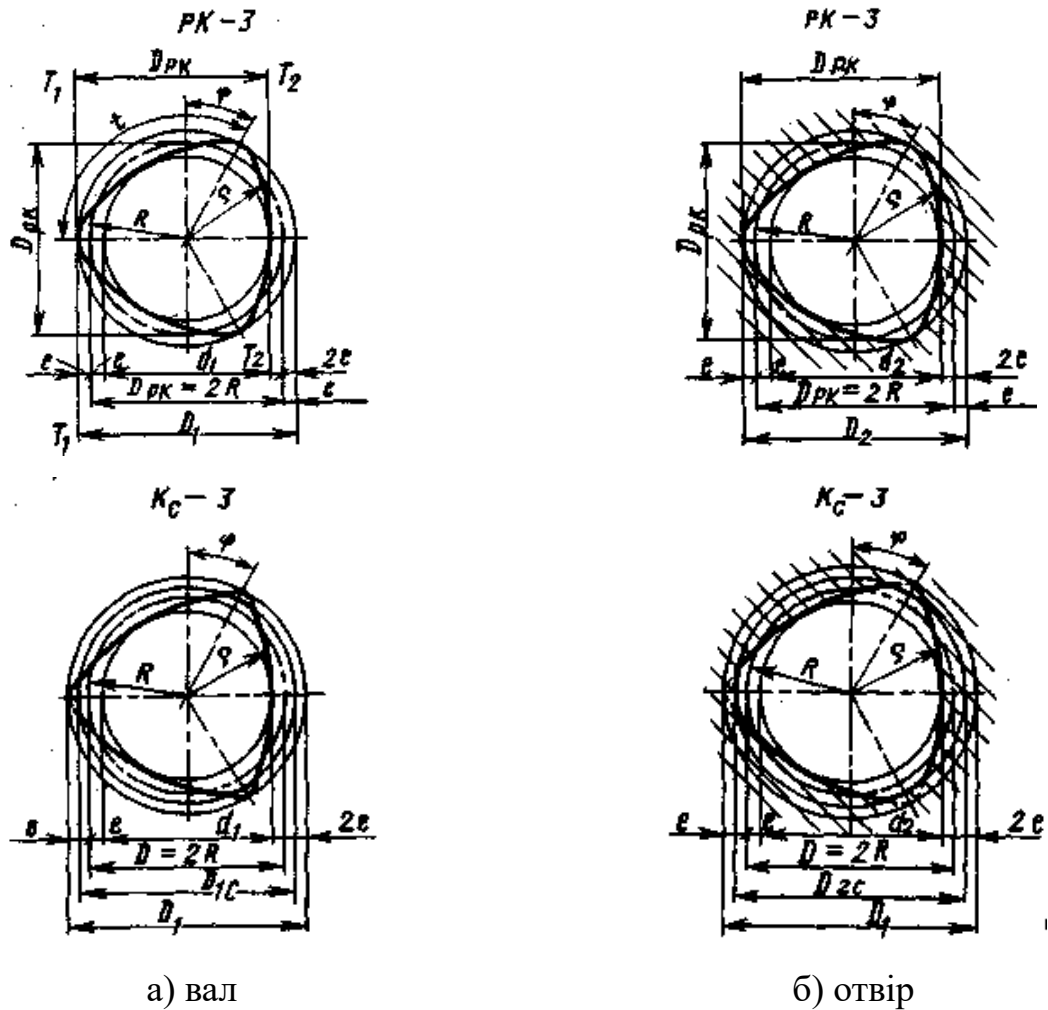


Рисунок 1.12 Геометричні параметри січень профільних з'єднань типів РК і КС.

Треба відзначити, що лише в профіля, типу “рівновісний контур” (РК-3, РК-5, РК-7 і т.д.) діаметр середнього кола D дорівнює номінальному значенню розміру профіля D_{PK} (рис. 1.4 а), що за вимірювання розміру РК- профільних валів дозволяє застосувати універсальні вимірювальні методи, які використовуються для вимірювання розмірів круглих валів.

1.5. Аналітичні залежності полігональних поверхонь

Контурні криві в профільних з'єднаннях можуть бути рівновісними, синусоїдальними (синоїдними), циклоїдними (епі-, пери-, гіпоциклоїди) тощо.

Рівняння профільних кривих у параметричному виді (X, Y) і полярного кута θ мають такий вигляд [18]:

- рівновісний контур

$$X = (R - e \cdot \cos(N \cdot \varphi)) \cdot \cos \varphi - N \cdot e \cdot \sin(N \cdot \varphi) \cdot \sin \varphi; \quad (1.19)$$

$$Y = (R - e \cdot \cos(N \cdot \varphi)) \cdot \sin \varphi + N \cdot e \cdot \sin(N \cdot \varphi) \cdot \cos \varphi; \quad (1.20)$$

$$\theta = \varphi + \operatorname{arctg} \frac{N \cdot e \cdot \cos(N \cdot \varphi)}{R - e \cdot \sin(N \cdot \varphi)}, \quad (1.21)$$

де $R = \frac{D_{PK}}{2}$ – середній радіус профілю;

N – число граней профільної кривої;

e – ексцентриситет;

φ – кутовий параметр.

- синусоїдальний (синоїда)

$$X = (R - e \cdot \cos(N \cdot \varphi)) \cdot \cos \varphi; \quad (1.22)$$

$$Y = (R - e \cdot \cos(N \cdot \varphi)) \cdot \sin \varphi. \quad (1.23)$$

- гіпоциклоїдний

$$X = e \cdot \cos \varphi + \frac{R \cdot \cos \varphi}{2}; \quad (1.24)$$

$$Y = e \cdot \sin \varphi - \frac{R \cdot \sin \varphi}{2}; \quad (1.25)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X} = \frac{e \cdot \sin \varphi - \frac{R \cdot \sin \varphi}{2}}{e \cdot \cos \varphi + \frac{R \cdot \cos \varphi}{2}} \quad (\text{для } N = 3). \quad (1.26)$$

- перициклоїдний

$$X = \frac{R \cdot \cos \varphi}{4} - e \cdot \cos \varphi; \quad (1.27)$$

$$Y = \frac{R \cdot \sin \varphi}{4} - e \cdot \sin \varphi; \quad (1.28)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{Y}{X} = \frac{\frac{R \cdot \sin \varphi}{4} - e \cdot \sin \varphi}{\frac{R \cdot \cos \varphi}{4} - e \cdot \cos \varphi}. \quad (1.29)$$

Широко застосовується в Угорщині та Кореї профільне з'єднання, що не відноситься до сімейств рівновісних, синоїдних і циклоїдних кривих, і отримало назву “Угорський профіль”. При проведенні токарної обробки профільних з'єднань цього типу криві вала і отвору описуються рівняннями:

$$X=R \cdot \cos \varphi + e \cdot \cos ((N-1) \cdot \varphi); \quad (1.12)$$

$$Y=R \cdot \sin \varphi + e \cdot \sin ((N-1) \cdot \varphi). \quad (1.13)$$

1.6. Мета і задачі досліджень

Метою кваліфікаційної роботи є оцінка стану розвитку способів і засобів обробки полігональних поверхонь та розробка нових конструкцій верстатів з покращеними технологічними можливостями.

Для досягнення мети потрібно вирішити такі основні задачі:

- провести аналіз області застосування профільних поверхонь;
- провести аналіз діючих способів формоутворення профільних поверхонь;
- провести технологічні розрахунки типової деталі, що містить профільні поверхні;
- спроектувати та розробити компоновку верстата для можливості обробки профільних поверхонь;
- провести розробку основних виконавчих вузлів запропонованого верстату;
- провести дослідження як геометричних, так і кінематичних характеристик способу обробки полігональних отворів.

РОЗДІЛ 2

ІНФОРМАЦІЙНО-ПАТЕНТНІ ДОСЛІДЖЕННЯ З ОБРОБКИ ПРОФІЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

2.1. Визначення та елементи класифікацій полігональних поверхонь

Полігональною поверхнею вважають таку поверхню, яка має три характерні ознаки: некруглість, симетричність та замкненість [23].

Некруглість – коли полігональна поверхня характеризується змінним радіусом, що залежить від кута її повороту навколо власної осі.

Симетричність – коли полігональна поверхня повинна мати поворотну симетрію, тобто вона суміщається сама з собою при повороті навколо власної осі. Кількість суміщень повинна відповідати числу граней полігональної поверхні і не повинна бути меншою 2-х.

Замкненість – коли поперечний переріз полігональної поверхні окреслений замкненою лінією.

Полігональні поверхні класифікують за такими ознаками:

- характерний напрямок;
- розташування;
- математичний опис;
- спосіб утворення;
- форма твірної лінії;
- форма граней;
- рівновісність;
- обмеженість з боку обробки.

1. Характерний напрямок. Полігональні поверхні залежно від напрямку бувають радіальні, торцеві або комбіновані.

У випадку радіальної полігональної поверхні (рис. 2.1, *a*)) характерним напрямком, в якому поширюється остання, є напрямок, що перпендикулярний до осі. Торцева (рис. 1.1, *б*) полігональна поверхня має характерний напрямок

поширення вздовж осі. Як приклад застосування комбінованої полігональної поверхні може бути орнамент, нанесений на кінці валу (рис. 1.1, *в*).

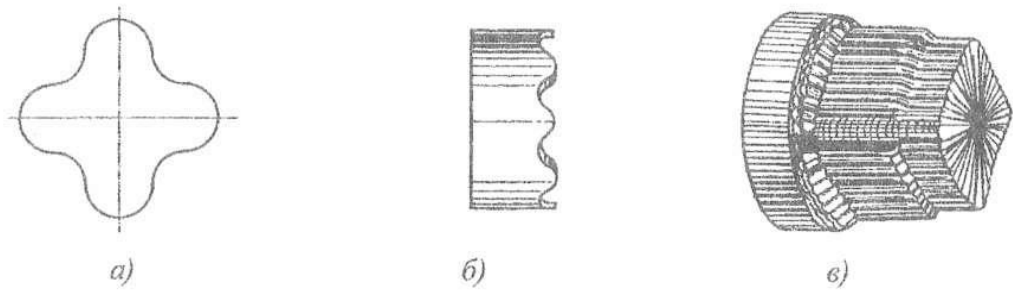


Рисунок 2.1 Радіальна (а), торцева (б) та комбінована (в) полігональні поверхні

2. *Розташування.* Радіальні полігональні поверхні можуть розташовуватись на внутрішній (рис. 2.2, *а*) або зовнішній (рис. 2.2, *б*) поверхнях деталі.

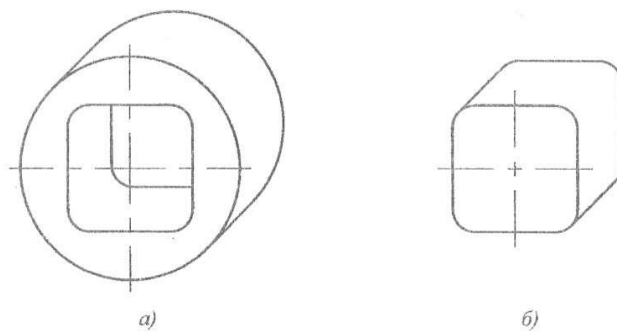


Рисунок 2.2 Внутрішня (а) і зовнішня (б) полігональні поверхні

3. *Математичний опис.* Полігональні поверхні бувають алгебраїчні, табличні та конструктивні.

У випадку *алгебраїчної* полігональної поверхні профіль описується певною математичною залежністю. Профіль *табличної* полігональної поверхні заданий у вигляді детальної таблиці з координатами характерних точок. *Конструктивні* полігональні поверхні утворені як комбінації простих, алгебраїчних та / або табличних поверхонь.

4. *Спосіб утворення.* Залежно від характеру руху твірної лінії полігональні поверхні можуть бути віднесені до класу циліндроїдів або конусоїдів.

Утворення означених поверхонь більш детально описане в [18, 20]. В загальному випадку полігональна поверхня утворюється при безперервному русі твірної c вздовж напрямних кривих a і b , що не лежать в одній площині. Але для утворення *поверхні-циліндроїда* (рис. 2.3, *а*)) твірна c має бути в усіх своїх положеннях паралельною деякій площині Δ , а для утворення *поверхні-конусоїда* (рис. 2.3, *б*)) вона повинна перетинати деяку задану пряму d (переважно, це вісь полігональної поверхні-конусоїда) в точці A , яка може рухатись вздовж прямої c і відповідно до руху твірної c вздовж напрямних a і b .

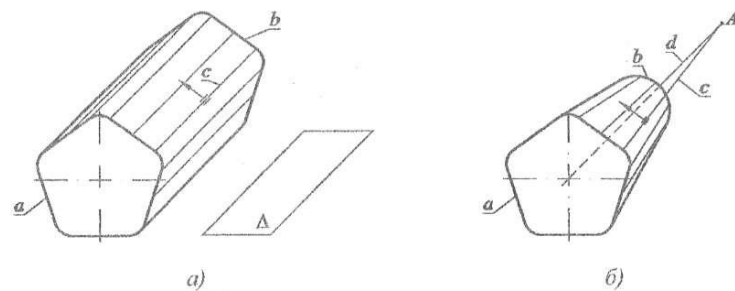


Рисунок 2.3 Схема утворення полігональної поверхні:
а) - *циліндроїда*, *б*) - *конусоїда*

5. *Форма твірної*. Залежно від лінійності твірної полігональні поверхні можуть бути *лінійчатими* (рис. 2.4, *а*)) і *нелінійчатими* (рис. 1.4, *б*)).

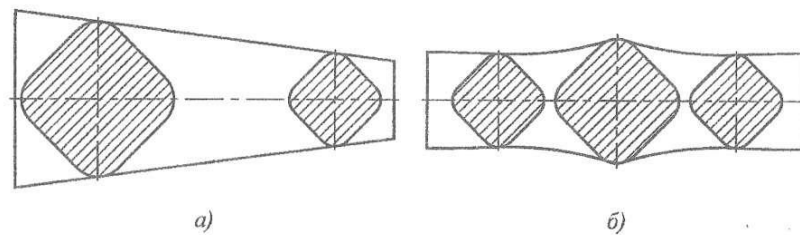


Рисунок 2.4 Лінійчата (*а*) і нелінійчата (*б*) полігональні поверхні

6. *Форма граней*. Полігональну поверхню вважають *опуклою* (рис. 2.5, *а*)), якщо її профіль містить всі точки відрізка, який з'єднує дві будь-які точки профілю [22]. В іншому випадку поверхня вважається *увігнутою* (рис. 2.5, *б*)).

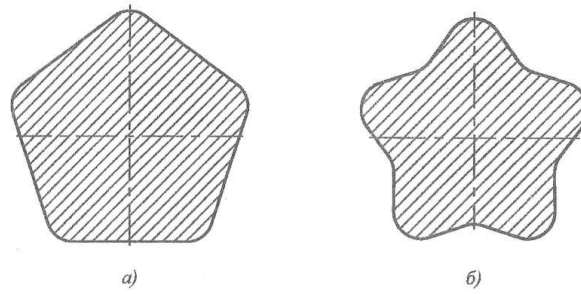


Рисунок 1.5 Опукла (а) і увігнута (б) полігональні поверхні

7. *Рівновісність*. Дана ознака характерна лише для радіальних полігональних поверхонь з непарним числом сторін. Суть її полягає в тому, що за рівновісного контуру всі діаметри полігональної поверхні рівні між собою. Типовим прикладом рівновісного контуру вважають трикутник Рело [28].

8. *Обмеженість* відносно сторони обробки. За цією ознакою полігональна поверхня може бути необмеженою (рис. 2.6, а)), чи обмеженою з кінця (до межі) (рис. 2.6, б)), чи обмеженою на початку (після межі) (рис. 2.6, в)), або обмеженою з обох боків (між межами) (рис. 2.6, г)).

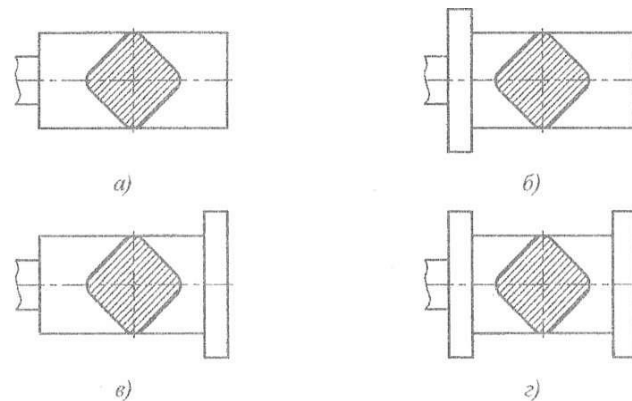


Рисунок 1.6 Необмежена (а) і обмежені (б, в і г) полігональні поверхні

2.2. Аналіз області застосування профільних полігональних поверхонь

Полігональні поверхні, порівняно з традиційними – прості та не мають такого широкого застосування. В той же час виділяють декілька галузей промисловості, де полігональні поверхні використовуються найчастіше.

Сюди відносяться:

- передача крутного моменту при відсутності відносного повороту контактуючих деталей (муфти);
- забезпечення необхідного руху вихідної ланки (кулачковий механізм);

- при передачі обертального руху;
- в об'ємних машинах і пристосуваннях (двигуни і насоси);
- опори ковзання (багатоклинові гідродинамічні підшипники);
- в затискних механізмах.

2.2.1. Використання профільних полігональних поверхонь для з'єднань вузлів та механізмів.

Профільні безшпонкові з'єднання використовуються для передачі крутного моменту взамін шлицевих і шпонкових з'єднань у конструкціях машин, вузлів і механізмів. Безшпонкові з'єднання виконують з гарантованим зазором чи натягом, а також виконують з перехідними посадками. Вони можуть бути як циліндричної, так і конічної форми, а отвори в маточинах – можуть бути наскрізними і глухими.

Найпростіше профільне з'єднання [12, 13] утворюється шляхом спряження деталей квадратного перерізу (рис. 2.7, а). Для передачі великих навантажень деталі спряжують по гладкій некруглій поверхні (рис. 2.7, б) - циліндричній або конічній (рис. 2,7, в).

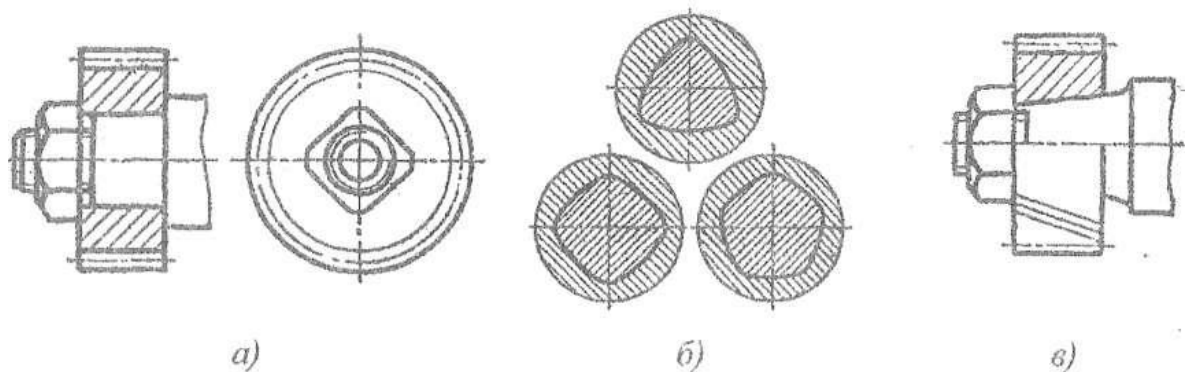


Рисунок 2.7 Профільні з'єднання

Профільні з'єднання можуть бути з випуклими, прямими й ввігнутими гранями. Криві профільних з'єднань поділяють на два види: неперервні та перервні. В свою чергу кожний з цих типів кривих профільних з'єднань ділиться на 2 підвиди: неперервні, типу РК і К, і перервні (зрізані) типу К_С (рис. 2.8).

Перший: профільні криві з рівновісним контуром, зокрема з непарною кількістю граней – РК-профіль (РК-1, РК-3, РК-5, РК-7 і т.д., де 1, 3, 5 і т.д. –

число граней (кратність) профільної кривої); профільні криві з парною кількістю граней – К-профіль (К-2, К-4, К-6, К-8 і т.д.) [31].

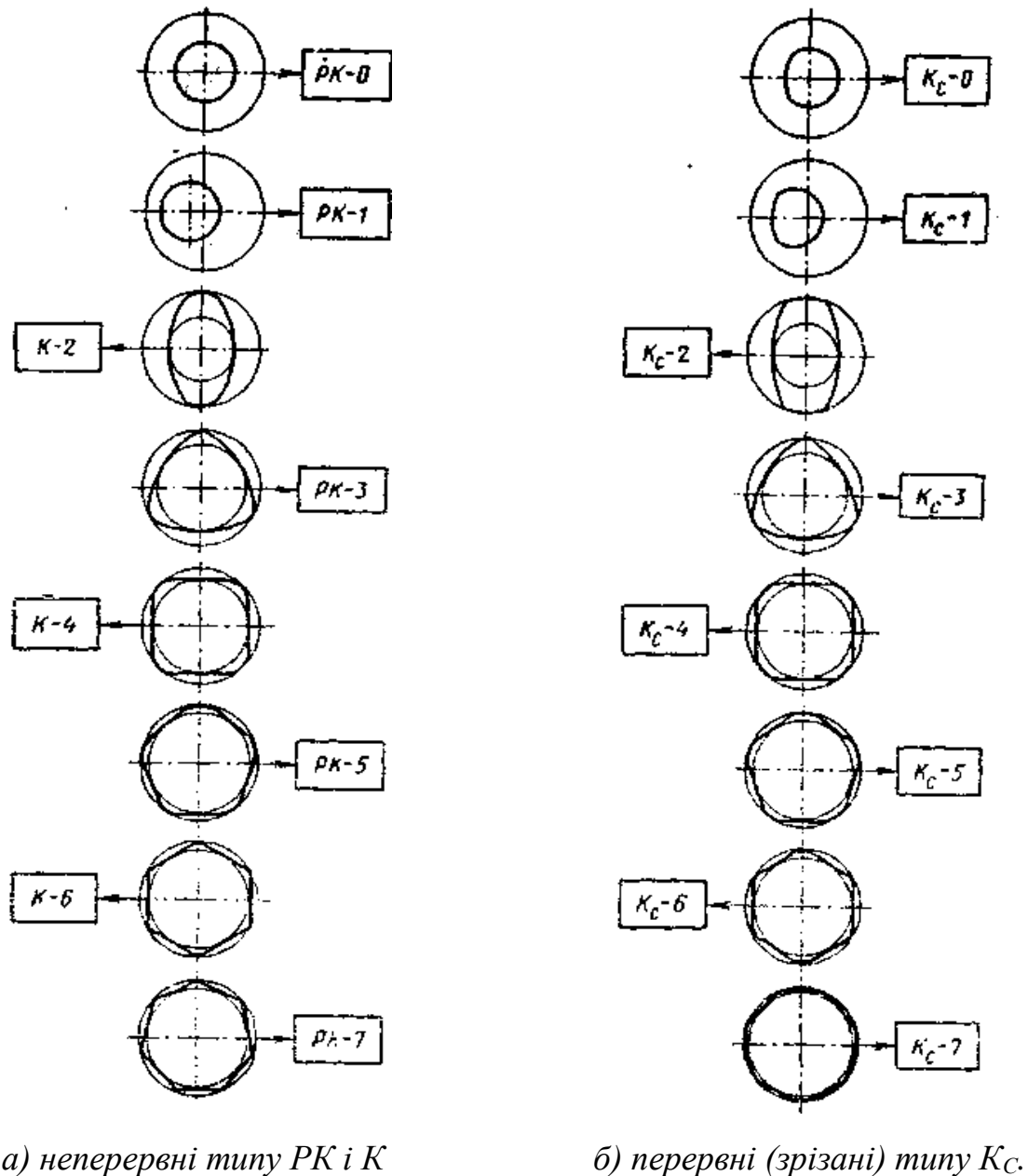


Рисунок 2.8 Види кривих профільних з'єднань

Другий: профільні криві, де контурна крива має зрізаний по вершинах вигляд – K_c -профіль (K_c-1 , K_c-2 , K_c-3 , K_c-4 , і т.д.). У вітчизняному і закордонному виробництві найбільш часто застосовуються наступні профільні з'єднання: з трьома граннями ($PK-3$), з трьома зрізаними граннями (K_c-3), з чотирма зрізаними граннями (K_c-4) і з п'ятьма граннями ($PK-5$ і K_c-5).

Основи теорії, робота і розрахунок профільних з'єднань приведені в [18], а довідкові матеріали - в [19].

Приклади ефективного використання РК-профільних з'єднань [18] приведені на рис. 2.9.

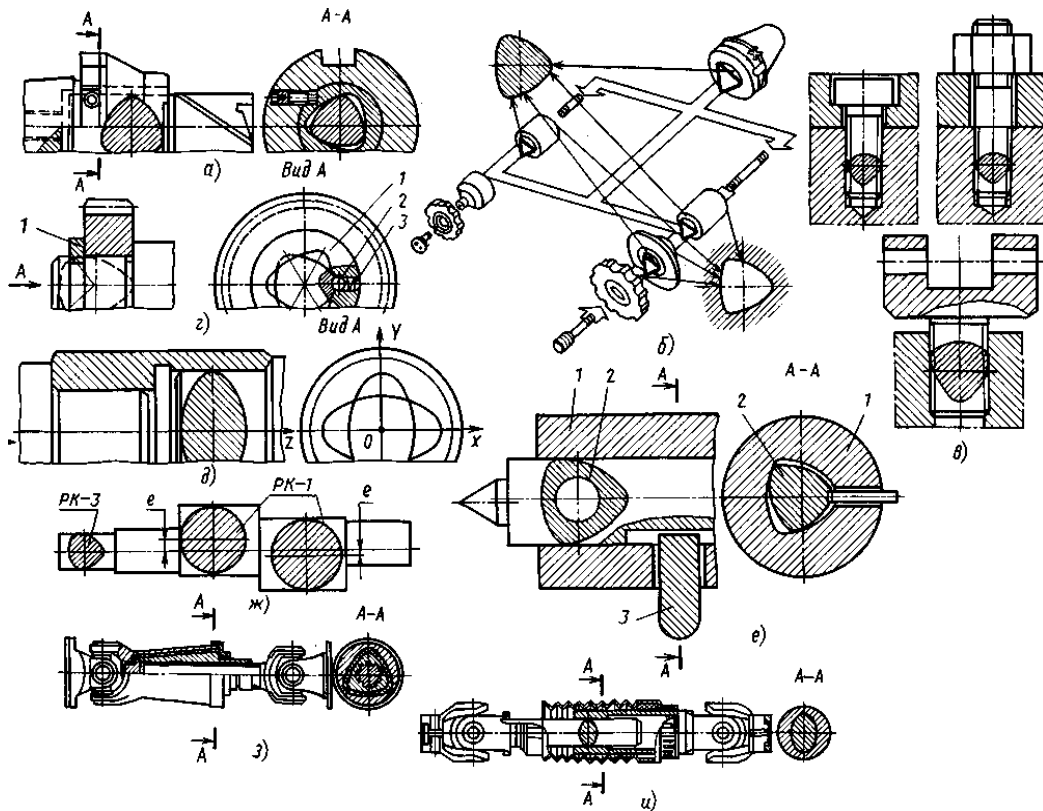


Рисунок 2.9 Приклади використання РК-профільних з'єднань в елементах різних машин, допоміжних і ріжучих інструментів:

- а) інструментальна державка фірми Bendix (США) для можливості встановлення обертового ріжучого інструмента із циліндричним РК-профільним хвостовиком;
- б) гнучка модульна інструментальна система (фірма Sitzmann und Heinlein, ФРН);
- в) самоконтруючі різьбові РК-профільні з'єднання;
- г) осьовий фіксатор з РК-профільним отвором;
- д) втулкова муфта з профільним (К-2) отвором;
- е) піноль задньої бабки верстата з РК-профільним з'єднанням;
- ж) водило редуктора з позаполюсним зачепленням;
- з) пружний карданний вал з конусоподібним РК-профільним з'єднанням;
- и) безлюфтовий карданний вал рульового керування для легкового автомобіля

У сучасному машинобудуванні використовують профільні безшпонкові з'єднання з різним числом граней (кратністю), що залежить від призначення з'єднання, і широко застосовуються у вузлах різних машин і механізмів: у коробках швидкостей металорізальних верстатів, автомобілів, тракторів, у

шпindelних вузлах, в кувальному і пресовому обладнанні, в екскаваторах, редукторах, пневмоінструментах, в ріжучих та допоміжних інструментах, карданних з'єднаннях та інших вузлах і машинах, де потрібно передавати значний крутний момент.

Застосування РК- профільних з'єднань є ефективним:

- при передачі крутного моменту з валу на зубчасте колесо (і навпаки) у металорізальних верстатах, в роботах, в ковальсько-пресовому та ливарному й іншому обладнанні, у редукторах, у ливарних машинах, роторах електродвигунів і т.д.;
- в різальних інструментах: свердлах, зенкерах, мітчиках (звичайних і накатниках), шпонкових і пальцевих фрезах тощо (профільні хвостовики); у торцевих, циліндричних, черв'ячних і дискових фрезах (профільні отвори); у плашках для нарізування різі на болтах (зовнішній профільний контур);
- у технологічному пристосуванні: гнучких модульних інструментальних системах для багатоцільових верстатів з ЧПК; в допоміжному інструменті для використання в розточних верстатах; в допоміжному інструменті для агрегатних верстатів, технологічних оправках для різних операцій.

Впровадження РК-профільних з'єднань дозволило знизити масу машин, поліпшити їх шумові й енергетичні характеристики, підвищити несучу здатність механічних вузлів, збільшити надійність роботи ріжучих інструментів, знизити витрати на їх виготовлення [18].

Переваги профільних з'єднань наступні:

1. Опір втомі РК-профільних валів в 3-5 разів вищий, ніж у шліцевих [14]. Підвищення опору втомі збільшує несучу здатність валів профільних з'єднань: у 1,2-1,3 рази в з'єднаннях із зазором; і у 2 рази в з'єднаннях з натягом.

2. При збереженні несучої здатності з'єднань маса моментопередавальної ступені РК-профільного валу може зменшуватись на 20-40 % тільки внаслідок зменшення поперечного перерізу. Зменшення маточини з РК-профільним отвором є наслідком або підвищення несучої здатності деталей з'єднання, або визначеності (при $N = 3$) базування маточини відносного вала. У деяких

випадках довжина моментопередавальної ступені вала може бути зменшена майже на 30 % внаслідок відсутності радіусного виходу від шліцевої фрези. При використанні пустотілих валів також значно зменшується маса профільних валів, а відсутність таких гострих переходів, які є в западинах шпонок і шліців, нівелює концентрацію напружень пустотілого валу.

3. РК-профільні з'єднання володіють більш високим ККД, ніж шпонкові і шліцеві, що приводить до зменшення витрати енергії при передачі крутного моменту. Це можна пояснити виключенням у РК-профільному з'єднанні (у зв'язку з відсутністю шпонок і шліців) циклічного тертя ковзання в контактуючих бічних поверхнях шпонок і шліців, що під навантаженням.

4. Профільні з'єднання з трьома граням (РК-3-профільні) мають здатність автоматичного центрування під навантаженням, яке передається. Завдяки цьому точність центрування РК-3-профільних з'єднань під навантаженням максимальна і на три квалітети вища шліцевих [24].

5. У РК-3-профільному з'єднанні з співвідношенням під час автоматичного центрування під навантаженням зустрічається явище самозаклинювання (самогальмування) маточини зубчастого колеса відносно профільної ступені вала.

Самогальмування під навантаженням переводить РК-3-профільне з'єднання із з'єднань із зазором в з'єднання з натягом, що при цьому збільшує жорсткість на згин деталей профільного з'єднання. При цьому вал і зубчасте колесо перетворюються в єдину механічну систему із загальною масою, що не відбувається з деталями шліцевих з'єднань. Збільшення маси системи призводить до зменшення частоти й амплітуди її коливань. Шум в роботі коробок швидкостей в горизонтально-фрезерному верстаті мод. 6Г81Г на 3-5 дБ нижчий порівняно із шумом при роботі аналогічних коробок з шліцевими з'єднаннями [24].

6. РК-3-профільні з'єднання в різальних інструментах збільшують їх стійкість, міцність і крутну жорсткість інструментальних оправок [14].

7. РК-3-профільні хвостовики свердел, мітчиків і інших мірних інструментів забезпечують стовідсоткову гарантію непрокручуваності відносно трьохкулачкових патронів, цанг і оправок, що захищає ці інструменти від передчасної поломки і дозволяє збільшити продуктивність обробки.

Можливість застосування антифрикційних покриттів підвищує термін служби деталей профільних з'єднань, що працюють в агресивних середовищах. За даними виготовлення деталей профільних з'єднань типів РК і КС вони на 40-50 % дешевші, ніж шліцьові [14].

Застосування профільних валів дозволяє майже в 2 рази зменшити чисельність основних робітників, а також виробничі площі і к-ть металорізального обладнання порівняно з необхідним для виготовлення деталей шпонкових і шліцевих з'єднань. При цьому зменшується номенклатура металорізального обладнання. При обробці РК-профільних поверхонь на заготовках валів і в отворах маточин застосовують технології зміцнення - наклеп, розкатку, дорнування, напилювання зносостійких матеріалів на профільні поверхні з черговою їх обробкою.

До технологічних переваг профільних з'єднань відносять, також, можливість застосування при шліфуванні РК- і К-профільних валів і отворів електронних пристроїв з активним контролем і систем адаптивного керування синхронізацією формоутворюючих рухів.

2.2.2. Використання профільних полігональних поверхонь як носіїв інформації.

Використання полігональних поверхонь як носіїв інформації про *закон руху* вихідної ланки ілюструють наступними прикладами кулачкових механізмів [13].

Кулачок 1 (рис. 2.10, а), який обертається навколо нерухомої осі А, містить три профільовані ділянки а, що отримані зі спряжених дуг кіл. Штовхач 2, який рухається поступально в нерухомих напрямних В-В, містить два ролики 3, що контактують з ділянками а кулачка 1. Геометричне замикання механізму

забезпечується однаковістю всіх діаметрів центрального профілю кулачка і відстані CD між центрами роликів J . За один повний цикл руху механізму штовхач 3 має три фази підйому та опускання.

Механізм (рис. 2.10, б) також містить кулачок у вигляді полігональної поверхні. Кулачок 1 , що обертається навколо нерухомої осі A , має форму трикутника Рело. Штовхач 2 , що рухається поступально в нерухомих напрямних $B-B$, містить рамку e , що складається з прямолінійних ділянок d . При дотику кулачка 1 з ділянками d рух штовхача 2 здійснюється за гармонічним законом.

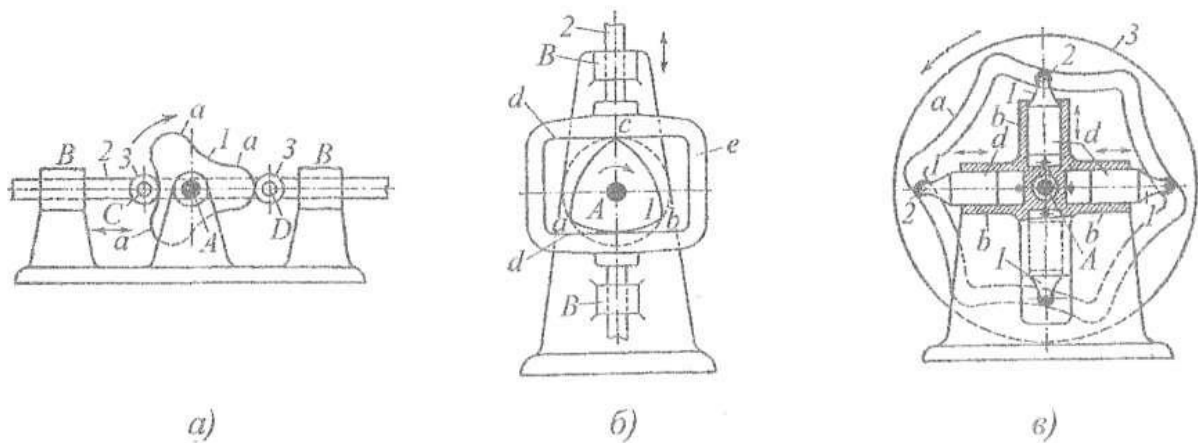


Рисунок 2.10 Кулачкові механізми з ланками, що мають полігональні поверхні:

- а) - механізм з трипрофільним кулачком, б) - механізм з тридуговим кулачком в рамці, в) - механізм з чотирма ведучими штовхачами

Кулачковий механізм [9], що використовується, наприклад, в об'ємній машині, працює таким чином. Поршні d (рис. 2.10, в) штовхачів L , що рухаються в циліндрах b , приводиться в рух газом, що розширюється. Штовхачі 1 мають ролики 2 , які переміщуються по профільному пазу a , що містить шість симетрично розташованих ділянок і є полігональною поверхнею. При поступальному русі поршнів d диск 3 з пазом a обертається навколо нерухомої осі A . Послідовність переміщень штовхачів та їх цикли руху регулюються спеціальними пристроями, зв'язаними з процесом запалювання горючої суміші в циліндрах. Кінематичне замикання механізму забезпечується рівністю діаметрів роликів 2 ширині пазу a .

2.2.3. Використання профільних полігональних поверхонь для передачі обертального руху.

Найчастіше при передачі обертального руху за умови збереження заданого передавального відношення застосовують евольвентне зачеплення. В той же час, в більшості випадків використовуються інші види зачеплення [14], зокрема циклоїдальне, яке, в свою чергу, поділяється на безпосередньо циклоїдальне, цівкове та позацентроїдне [15]. Ці з'єднання наведені на рис. 2.11.

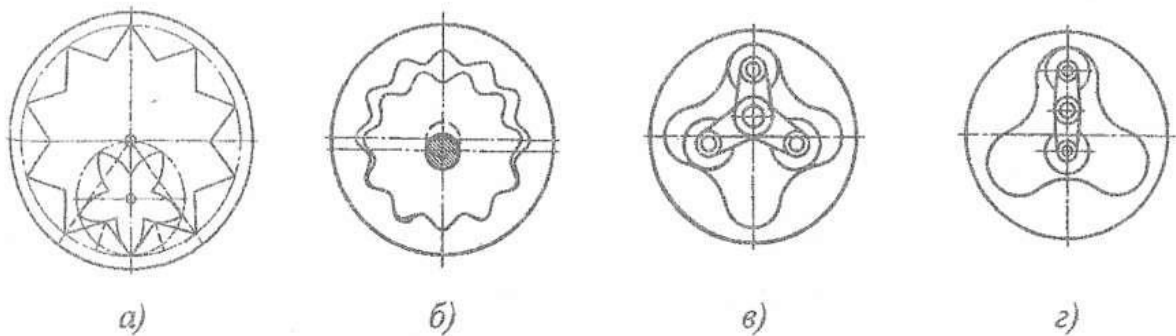


Рисунок 2.11 Різновиди циклоїдального зачеплення:

а) – внутрішнє; б) – зубчасте з заокругленими зубцями; в) – важільне з роликами; г) - цівкове

Внутрішнє зачеплення (рис. 2.11, а) має передавальне відношення 1:2 та має прямолінійний профіль зуба колеса з внутрішнім вінцем. Зубчасте зачеплення (рис. 2.11, б) містить заокруглені зубці, при цьому к-ть зубців колеса з внутрішнім зачепленням є на одиницю меншою, ніж з зовнішнім. Трьохплечовий важіль з роликами (рис. 2.12, в), що рухається в чотирьохпроменевому криволінійному прорізі, забезпечує передавальне відношення 4:3. Так само працює цівкове зачеплення (рис. 2.12 г), яке забезпечує передавальне відношення 3:2.

Ще одним видом використання полігональних поверхонь при передачі потужності обертання вважають передачу з точковим зачепленням М.Л. Новікова [15].

Для забезпечення нерівномірності обертання вихідної ланки зубчастої передачі часто застосовують колеса [15], у яких початкова лінія є не круглою, а містить полігональний профіль (рис. 2.12).

$2 \cdot \pi$, в похідних колесах буде відповідати кут повороту π . Одному оберту ведучої ланки відповідають два періоди зміни передавального відношення;

В передачі у формі трилистника ($m = 3$) (рис. 2.12, б) одному оберту ведучої ланки відповідають 3 періоди ($\varphi' = 120^\circ$) зміни передавального відношення.

Ще одна є цікава передача (рис. 2.12, в), в якій ведуче колесо в формі дволистника, а ведене – у формі трилистника. Потрібно на вихідних еліпсах вибрати рівні дуги PB_1 та PB_2 так, щоб кути φ_1 та φ_2 відносились як 3:2. Перекочувані дуги повинні відповідати деяким частинам еліпсів.

2.2.4. Використання профільних полігональних поверхонь в об'ємних машинах.

Черговим прикладом є застосування полігональних поверхонь в певних видах *об'ємних машин*, зокрема в двигунах внутрішнього згоряння. Так, в роторно-поршневому двигуні інженером підприємства NSU (ФРН) Ф. Ванкелем [16] полігональними виконані як внутрішня поверхня статора, так і зовнішня поверхня контактуючого з ним ротора (рис. 2.13).

Помітним є те, що принцип дії двигуна полягає в перекочуванні тригранного ротора по двохгранній порожнині корпусу.

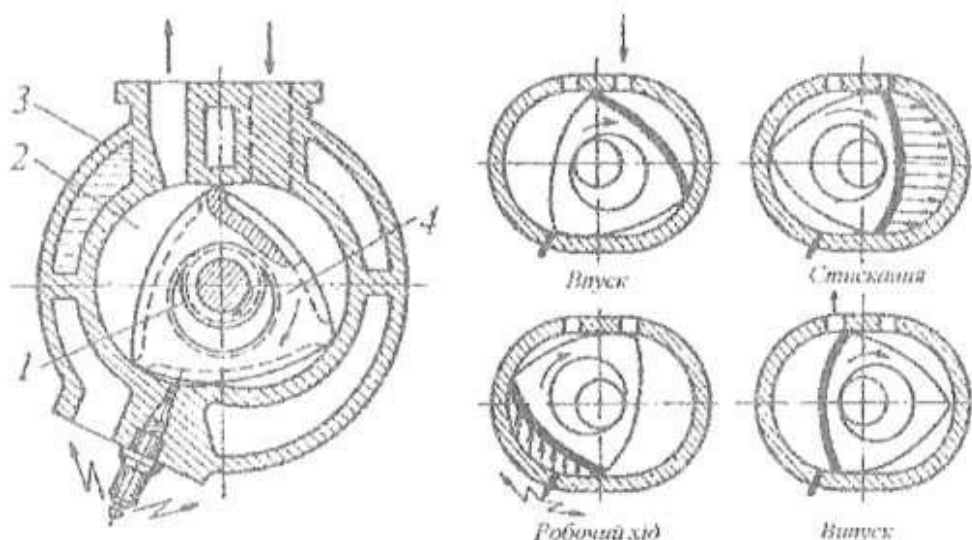


Рисунок 2.13 Поперечний переріз (зображено ліворуч) та принцип роботи (праворуч) роторно-поршневого двигуна Ф. Ванкеля

В основу роторного двигуна [16] Р. Саріча (Австралія) покладено принцип роботи коловортного насосу, де пластини розмежують камери змінного об'єму. Зразки двигуна мають сім робочих камер (рис. 2.14, а), причому в кожній з них встановлені свічки запалювання, а також впускний та випускний клапани (рис. 2.14, б). Ротор виконаний семигранним і здійснює ексцентричні коливання під дією центрального кривошипного валу. Лопатки двигуна виконані П-подібними (рис. 2.14, в). В радіальному напрямі вони коливаються в пазах корпусу, а ротор відносно лопаток при цьому одночасно переміщується по дотичній до кола.

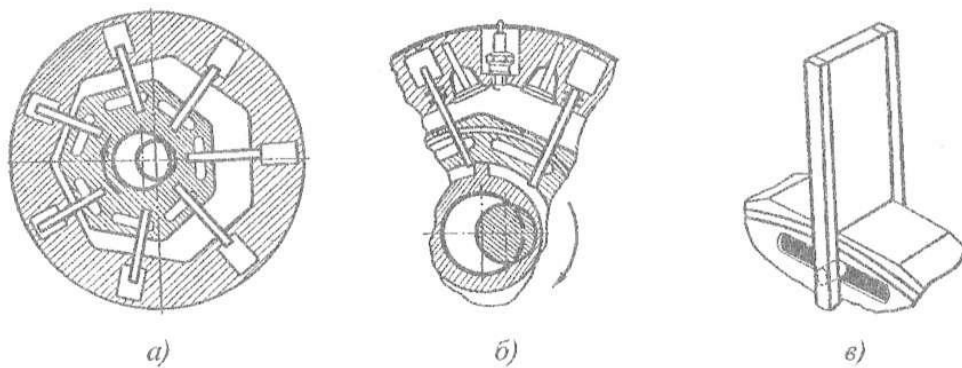


Рисунок 2.14 Схема двигуна Р. Саріча: *а* - поперечний переріз, *б* - такт стискання, *в* - лопатка двигуна

Звичайні поршневі двигуни внутрішнього згорання також можуть оснащуватись пристосуваннями, які містять деталі з полігональними поверхнями. Прикладом є двоходовий нагнітач [16], який використовується для піддуву двигунів (рис. 2.15).

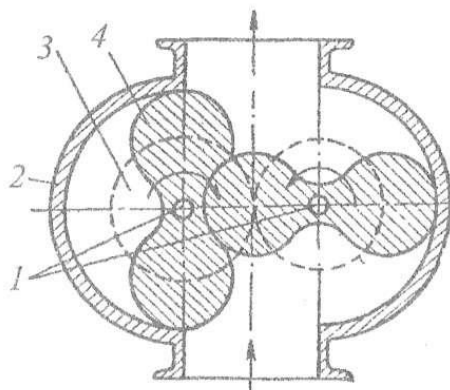


Рисунок 2.15 Двороторний нагнітач

Принцип дії двороторного нагнітача такий. На двох паралельних валах L, розташованих в корпусі 2 нагнітача, закріплені два дволопатеві ротори 4. Вали роторів за допомогою зубчастих коліс 3 з'єднані між собою і обертаються в протилежні боки. Повітря під дією розрідження надходить до нагнітача через нижній патрубок і заповнює весь об'єм між роторами і корпусом. Потім даний об'єм повітря переноситься до порожнини нагнітання, стискується при постійному об'ємі і виштовхується через верхній патрубок.

2.2.5. Використання профільних полігональних поверхонь в затискних механізмах.

Застосування полігональних поверхонь в *затискних механізмах* можна проілюструвати на прикладі роботи затискного патрону фірми Schunk (ФРН) (рис. 2.16) для дрібнорозмірного осьового інструменту [17].

Затискний патрон виконано як втулка з циліндричною зовнішньою і або полігональною (здебільшого тригранною) внутрішньою поверхнями (рис. 2.16, а). Для закріплення інструменту спеціальним пристосуванням втулку деформують радіальними силами таким чином, щоб внутрішня полігональна поверхня була круглою (рис. 2.16, б). Потім в отвір поміщається циліндричний хвостовик інструменту (рис. 2.16, в), після чого деформуюче навантаження з втулки знімається (рис. 2.16, г).

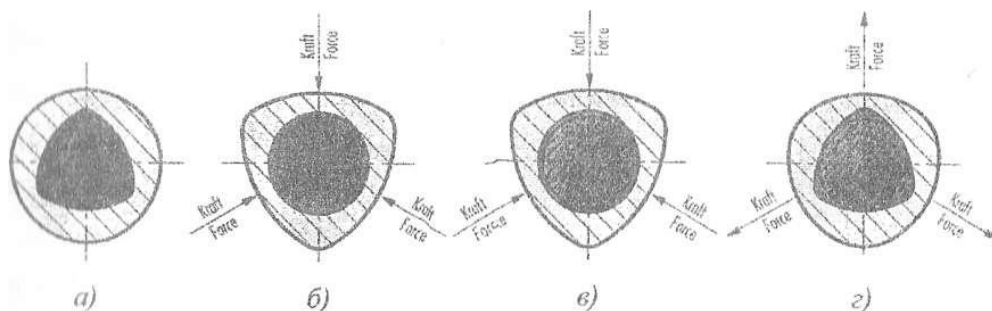


Рисунок 2.16 Принцип дії затискного механізму з використанням полігональної поверхні

Втулка, яка виготовлена з пружного матеріалу, старається повернути собі первісну форму. При цьому грані полігонального отвору притискуються до циліндричної поверхні хвостовика інструменту, надійно утримуючи цей хвостовик за рахунок сил тертя. Патрон має простоту і надійну конструкцію, а також високу точність: радіальне биття інструменту не перевищує 3...5мкм.

РОЗДІЛ 3

ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1. Вибір методів отримання заготовки

Метод виконання заготовок визначається призначенням і конструкцією деталі, матеріалом, технічними вимогами, масштабом та серійністю випуску, а також економічністю виготовлення. Вибрати заготовку – означає встановити спосіб її отримання, намітити припуски на обробку кожної поверхні, розрахувати розміри і вказати допуски на неточність виготовлення.

Для раціонального вибору заготовки необхідно одночасно враховувати всі вище перераховані вихідні дані, оскільки між ними існує тісний взаємозв'язок. Кінцеве рішення можна прийняти тільки після економічного комплексного розрахунку собівартості заготовки і механічної обробки в цілому.

Заготовки для даної деталі можуть бути отримані двома методами:

- 1) штамповка;
- 2) прокат.

Проведемо порівняння вартості заготовок, отриманих даними методами.

Вартість штамповки визначаємо за формулою 4.1 [2]:

$$S_{ум} = \frac{C}{1000} Q k_T k_C k_B k_M k_{II} - (Q - q) \frac{S_{відх}}{1000}, \text{ грн} \quad (3.1)$$

де $C_{ум}$ – базова вартість 1 т заготовок, грн.;

Q – маса заготовки, кг;

$k_T, k_C, k_B, k_M, k_{II}$ – коефіцієнти, які залежать від класу точності, групи складності, маси, марки матеріалу і об'єму виробництва заготовок.

q – маса готової деталі, кг;

$S_{відх}$ – ціна 1 т відходів, грн.

Приймаємо $C_{ум} = 11800$ грн, $S_{відх} = 1800$ грн; $q = 5.26$ кг; $Q = 5.5$ кг.

Вибираємо коефіцієнти:

$k_T = 1.0$; $k_M = 1.0$; $k_B = 0.87$; $k_C = 0.84$; $k_{II} = 1.0$ [2].

$$S_{\text{шт.}} = \left(\frac{11800}{1000} \cdot 5.5 \cdot 1.0 \cdot 0.84 \cdot 1.0 \cdot 1.0 \cdot 0.87 \right) - (5.5 - 5.26) \cdot \frac{1800}{1000} = 47,00 \text{ грн.}$$

Визначимо вартість прокату по формулі 4.2 [3, с.31].

Приймаємо $C_n = 7800$ грн, $Q = 10.8$ кг.

Вартість прокату:

$$C_n = 0,001 \cdot (10.8 \cdot 7800 - (10.8 - 5.26) \cdot 1800) = 74,27 \text{ грн.}$$

Як видно з розрахунків, вартість штамповки менша, ніж вартість прокату.

При застосуванні заготовки, з прокату необхідні додаткові операції механічної обробки.

Застосування заготовки, отриманої штампуванням, дає можливість обробити деталь без додаткових операцій.

Враховуючи все це, приймаємо для даного матеріалу заготовку, отриману штампуванням.

3.2. Вибір схеми базування

Одним з найскладніших і принципових етапів проектування технологічних процесів є призначення технологічних і вимірювальних баз. Від правильного вибору технологічних баз значною мірою залежать: фактична точність виконання розмірів; правильність взаємного розташування поверхонь; ступінь складності пристроїв, різальних та вимірювальних інструментів; загальна продуктивність обробки. Основні положення, що стосуються термінології, класифікації та теорії базування, викладені в ГОСТ 21495-76.

Вихідними даними при виборі баз є: робоче креслення деталі, технічні умови на її виготовлення, вид заготовки та стан її поверхонь, бажаний ступінь автоматизації. Перш ніж вибрати бази для конкретної операції, необхідно чітко сформулювати завдання, що повинні бути вирішені в результаті виконання операції. Ці завдання впливають з вимог креслення та технічних умов на виготовлення деталі.

Завдання, що вирі на першій операції, зводяться до необхідності встановлення зв'язків, які визначають відстані та повороти оброблюваних

поверхонь відносно поверхонь, що залишилися необробленими, і рівномірного розподілу фактичних припусків між поверхнями.

Вибору баз на першій операції передують визначення поверхонь, що будуть використовуватись як бази на подальших операціях. Такими поверхнями, як правило, є основні бази, від яких задано більшість розмірів, що координують розташування інших відповідальних поверхонь деталі.

Відступи від цього правила можливі лише тоді, коли основна база має недостатню протяжність для надійного базування деталі або коли обробку виконують, використовуючи пристрій-супутник. Визначивши технологічні бази для наступних операцій, вибирають технологічні бази для першої операції. В більшості випадків можна реалізувати декілька варіантів базування. Готових рецептів на цей випадок немає, оскільки кожен із варіантів може мати свої позитивні і негативні сторони.

Наведемо лише деякі рекомендації:

Базові поверхні мають бути простими за формою та мати достатню протяжність. Заготовка повинна займати в пристрої відповідне їй місце під дією власної ваги, а не в результаті прикладення затискних зусиль.

Базові поверхні повинні бути чистими для забезпечення однозначності базування. Неприпустимо використовувати поверхні зі слідами роз'єму штампів, ливарних форм, залишками ливникової системи та іншими дефектами. З точки зору експлуатації деталі чорнові базові поверхні повинні бути найбільш відповідальними. В цьому разі при їх обробці на наступних операціях забезпечуються рівномірність припусків та однорідна за якістю поверхня.

З метою забезпечення правильного взаємного розташування оброблюваних поверхонь відносно необроблюваних базами для першої операції вибирають ті поверхні, які в готовій деталі повинні залишатись необробленими.

Після першої операції технологічні бази повинні бути змінені, оскільки двічі використовувати одні й ті самі бази вкрай небажано, а в більшості випадків недопустимо.

На всіх наступних операціях необхідно дотримуватись принципу суміщення технологічних, конструкторських та вимірювальних баз, також принципу сталості баз.

Бази повинні забезпечувати можливість обробки з однієї установки максимальної кількості поверхонь. Ця вимога особливо важлива при обробці деталей на верстатах з ЧПК, поздовжньо-стругальних та поздовжньо-фрезерних верстатах.

Одночасно реалізувати перелічені рекомендації практично не можливо. Так, рекомендації 3 і 4 явно суперечать одна одній. Тому завжди стоїть задача відшукати найбільш прийнятний варіант, що досягається аналізом переваг та недоліків кожного з можливих варіантів.

Отже, проаналізувавши вище описані рекомендації та існуючі методи та схеми базування деталей на внутрішньо-шліфувальних верстатах, приймаємо для нашого випадку схему базування яка представлена на рис. 3.1.

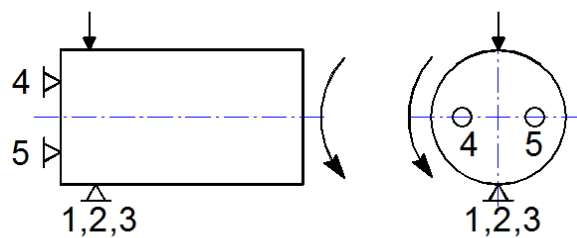


Рисунок 3.1 Схема базування

3.3. Вибір оптимального технологічного маршруту механічної обробки деталі–представника

Деталь представник при даному типі виробництва і програмі випуску можна виготовляти різними варіантами технологічного процесу.

1. З використанням універсального обладнання:

- 005. Заготівельна;
- 010. Токарна;
- 015. Шліфувальна;
- 020. Свердлильна;
- 025. Контрольно – вимірна.

2. З використанням верстатів з ЧПК:

- 005. Заготівельна;
- 010. Токарна з ЧПК;
- 015. Шліфувальна з ЧПК;
- 020. Свердлильна;
- 025. Контрольно – вимірна.

3. З використанням оброблюючого центру:

- 005. Заготівельна;
- 010. Токарно – шліфувальна – свердлильна;
- 015. Контрольно – вимірна.

4. З використанням верстату–автомату спеціального призначення:

- 005. Заготівельна;
- 010. Токарна;
- 015. Автоматна;
- 020. Контрольно – вимірна.

Проаналізуємо ці технологічні маршрути і виберемо оптимальний.

Отже маршрут №1 - має недоліки по використанню обладнання і людських ресурсів і як похідне - електроенергії, інструменту, пристосування тощо.

Технологічний маршрут №2 є досить перспективним, оскільки для забезпечення обробки необхідна реалізація складних формоутворюючих рухів. Дане обладнання може будуватись із окремих виконавчих вузлів – тобто на агрегатно-модульному принципі. При цьому необхідні блоки можна докупити для верстата в міру потреби. Для обслуговування верстату бажана наявність маніпулятора.

Технологічний маршрут №3 – використання спеціального оброблюваного центру. Основним недоліком цього варіанту є дуже висока вартість даного обладнання, воно по вартості більше ніж два верстати з ЧПК варіанту маршруту №2. Переваги обробка здійснюється повністю на даному верстаті.

Технологічний маршрут №4 – використання верстату-автомату спеціального призначення. Даний верстат має систему керування від розподільчого валу. Для проведення профільної обробки використовуються спеціальні пристрої з відокремленими приводами. Собівартість обробки деталі на такому верстаті є високою.

Самим оптимальним буде варіант №2, він має ряд переваг:

- висока точність обробки;
- можливість переналагодження;
- висока продуктивність;
- можливість агрегування в системи вищого рівня.

3.4. Призначення припусків та міжопераційних розмірів

При обробці профільних деталей важко говорити про призначення припуску в традиційному розумінні, оскільки при проведенні обробки ми отримуємо складну поверхню із змінним припуском. Величина припуску буде мінятися від 2 до 5 мм, в залежності від того, поверхню якого профілю ми будемо обробляти (тригранний отвір, чотиригранний, п'ятигранний). Ми можемо говорити про припуски на попередніх операціях, а саме – підрізання торця, розточування внутрішньої циліндричної та конічної поверхні, шліфування торця деталі. Формування профільного отвору проводиться кінцевим інструментом, при проведенні шліфувальної обробки.

Розрахуємо припуски на обробку поверхні (отвору) $\varnothing 50H8 (+0,050)$. Технологічний маршрут обробки отвору складається з двох операцій: чорнового та чистового розточування в заготовці комплексної деталі.

Якість поверхні деталі характеризується параметрами R_z і T .

Сумарне значення R_z і T , що характеризує якість поверхонь штамповок, складає 600 мкм [42].

Для чорнового розточування $R_z = 50$ мкм, для чистового розточування $R_z = 20$ мкм, [2].

Сумарне значення просторових відхилень для заготовки даного типу визначаємо за формулою [43]:

$$\rho = \sqrt{\rho_{кор}^2 + \rho_{см}^2}, \quad (3.3)$$

де: $\rho_{кор}$ – величина короблення отвору [3, с.87];

$$\rho_{кор} = \sqrt{(\Delta_k \cdot d)^2 + (\Delta_k \cdot l)^2} = \sqrt{(0,8 \cdot 50)^2 + (0,8 \cdot 50)^2} = 78 \text{ мкм};$$

Δ_k – питома кривизна заготовок, мкм на 1 мм довжини [2];

$\rho_{см}$ – сумарне зміщення отвору відносно зовнішньої поверхні [2];

$$\rho_{см} = \sqrt{\left(\frac{\delta_B}{2}\right)^2 + \left(\frac{\delta_\Gamma}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{200}{2}\right)^2 + \left(\frac{200}{2}\right)^2} = 284 \text{ мкм}, \quad (3.4)$$

де: δ_B, δ_Γ – допуски на розміри (Б), (Г) по класу точності, відповідному даній кованці.

Таким чином, сумарне значення просторового відхилення заготовки складає:

$$\rho = \sqrt{284^2 + 78^2} = 294 \text{ мкм}.$$

Величина залишкового відхилення після чорнового розточування:

$$\rho_1 = 0,05\rho = 0,05 \cdot 294 = 15 \text{ мкм}.$$

Похибка установки при чорновому розточуванні:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\varepsilon_\delta + \varepsilon_3}, \quad (3.5)$$

де: ε_δ – похибка базування; оскільки заготовка встановлюється в самоцентруючому патроні, то $\varepsilon_\delta = 0$ [2].

ε_3 – похибка закріплення заготовки; $\varepsilon_3 = 140$ мкм [2].

$$\varepsilon_1 = \sqrt{0^2 + 140^2} = 140 \text{ мкм}.$$

Похибка установки при чистовому розточуванні:

$$\varepsilon_2 = 0,05\varepsilon_1 = 0,05 \cdot 140 = 7 \text{ мкм}.$$

Таблиця 3.1. – Розрахунок припусків і граничних розмірів по технологічних переходах на обробку отвору $\varnothing 50H8 (+0,050)$

Технологічні переходи обробки поверхні $\varnothing 50H8 (+0,050)$	Елементи припуску, мкм				Розрахунковий припуск, $2z_{\min}$, мкм	Розрахунковий розмір d_p , мм	Допуск на виготовлення TD , мкм	Граничний розмір, мм		Граничні значення припусків, мкм	
	R_z	T	ρ	ε				d_{\min}	d_{\max}	$2z_{\min}^{np}$	$2z_{\max}^{np}$
Прокат	600		294	–	–	67,814	1500	66,31	67,81	–	–
Розточування чорнове	50		15	140	2·996	69,806	180	69,63	69,81	2000	3320
Розточування чистове	20		–	7	2·120	70,046	46	70,00	70,046	236	370

На основі записаних в таблиці даних проводимо розрахунок мінімальних значень міжопераційних припусків за формулою:

$$2z_{\min_i} = 2 \cdot \left(R_{z_{i-1}} + T_{i-1} + \sqrt{\rho_{i-1}^2 + \varepsilon_i^2} \right), \quad (3.6)$$

Мінімальний припуск під розточування:

чорнове

$$2z_{\min_1} = 2 \cdot \left(600 + \sqrt{294^2 + 140^2} \right) = 2 \cdot 920 \text{ мкм};$$

чистове

$$2z_{\min_2} = 2 \cdot \left(50 + \sqrt{15^2 + 7^2} \right) = 2 \cdot 66 \text{ мкм}.$$

Розрахунковий розмір визначаємо з кінцевого розміру шляхом послідовного віднімання розрахункового мінімального припуску кожного технологічного переходу:

для чорнового розточування

$$d_{p1} = 50,05 - 0,132 = 49,918 \text{ мм};$$

для заготовки

$$d_{p3} = 49,918 - 1,84 = 48,078 \text{ мм}.$$

Найменші граничні розміри визначаються з найбільших граничних розмірів шляхом віднімання допусків відповідних розмірів:

$$d_{\min 2} = 50,05 - 0,05 = 50,00 \text{ мм};$$

$$d_{\min 1} = 49,92 - 0,17 = 49,75 \text{ мм};$$

$$d_{\min 3} = 48,08 - 0,4 = 47,68 \text{ мм};$$

Граничні значення припусків:

$$2z_{\min 2}^{np} = 50,050 - 49,92 = 0,13 \text{ мм} = 130 \text{ мкм};$$

$$2z_{\min 1}^{np} = 50,00 - 49,75 = 0,25 \text{ мм} = 250 \text{ мкм};$$

$$2z_{\max 2}^{np} = 49,92 - 48,08 = 1,84 \text{ мм} = 1840 \text{ мкм};$$

$$2z_{\max 1}^{np} = 49,75 - 47,68 = 2,07 \text{ мм} = 2070 \text{ мкм}.$$

Величину номінального припуску і номінального діаметра заготовки визначаємо за формулами:

$$z_{o \text{ ном}} = z_{o \text{ min}} + B_3 - B_\delta = 1970 + 200 - 50 = 2120 \text{ мкм};$$

$$d_{z \text{ ном}} = d_{\text{ ном}} - z_{o \text{ ном}} = 50 - 2,1 = 47,9 \text{ мм}.$$

Проводимо перевірку правильності проведених розрахунків:

$$2z_{\max 2}^{np} - 2z_{\min 2}^{np} = 250 - 130 = 120 \text{ мкм};$$

$$TD_1 - TD_2 = 170 - 50 = 120 \text{ мкм};$$

$$2z_{\max 1}^{np} - 2z_{\min 1}^{np} = 2070 - 1840 = 230 \text{ мкм};$$

$$TD_3 - TD_1 = 400 - 170 = 230 \text{ мкм}.$$

Таблиця 3.2. – Зведена таблиця припусків

Розмір	Припуск		Допуск
	Табличний	Розрахунковий	
Ø50H8	2·2,0	2·1,06	±0,2

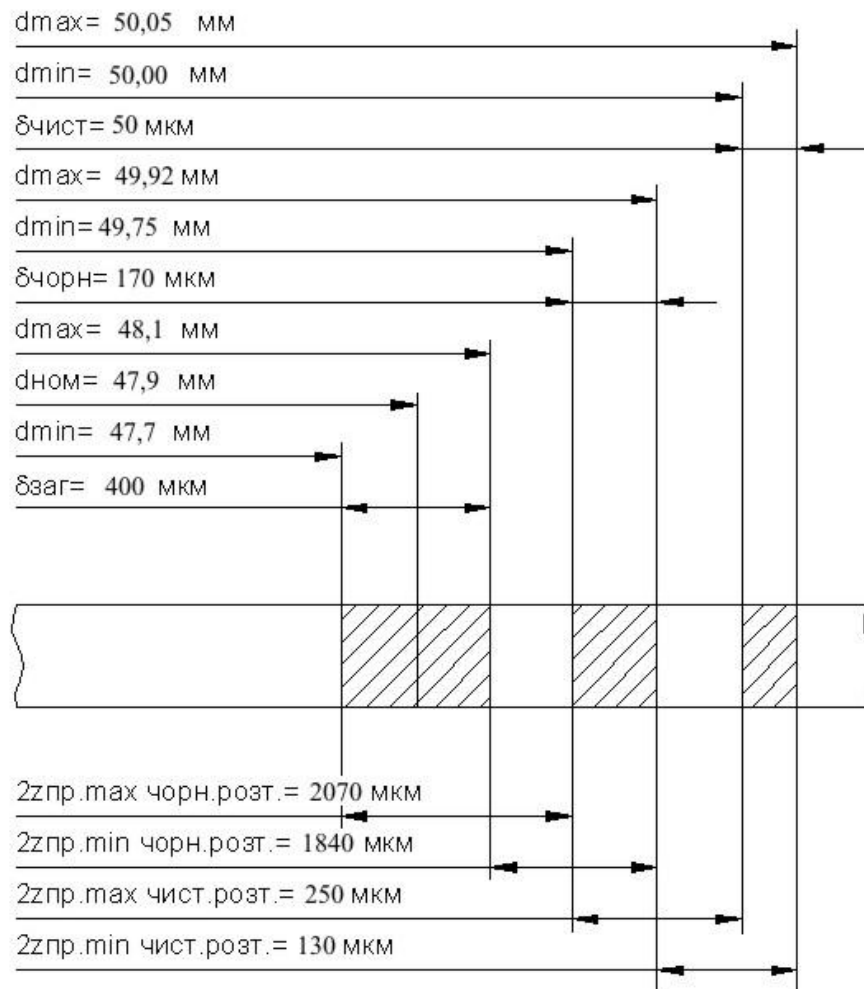


Рисунок 3.2 Схема розміщення полів припусків

3.5. Розрахунок режимів різання

Розрахунок режимів різання починається з вибору лімітуючих операцій для типової комплексної деталі. Під лімітуючими операціями будемо розуміти операції, при яких здійснюється обробка з граничними режимами різання. Для визначення діапазону регулювання необхідно визначити мінімальну і максимальну кількість обертів шпинделя. Для цього нам необхідно табличним методом визначити такі операції, при яких дана частота буде мінімальною і максимальною. Ці операції і будуть лімітуючими.

Вибір подачі. Максимальне та мінімальне значення подачі буде відповідати шліфуванню заготовки з діаметром отвору 30мм та 100мм, при матеріалі заготовки конструкційна сталь та сірий чавун.

Мінімальна подача відповідає чистовим режимам обробки і вибирається в залежності від необхідного класу чистоти поверхні і геометрії різального інструменту.

При розрахунку мінімальної швидкості різання слід керуватися такими даними:

- максимальним діаметром обробки;
- максимальною глибиною різання і подачі;
- фізико-механічними властивостями оброблюваного матеріалу;
- матеріалом різальної частини інструменту.

Максимальна швидкість різання відповідає чистовому точінню і при цьому слід враховувати:

- мінімальний діаметр обробки;
- мінімальну глибину різання і подачі;
- характеристики оброблюваного матеріалу;
- матеріал різальної частини інструменту.

Розрахунок режимів різання має суттєве значення для подальших розрахунків. Визначення мінімальних та максимальних частот обертання шпинделя (особливістю шліфування є те, що обертається інструмент та заготовка), забезпечить визначення діапазону регулювання та силових характеристик процесу різання.

В нашому випадку обробляються профільні отвори в деталях типу втулок, фланців, дисків виготовлених із конструкційних сталей або сірого чавуна.

Визначимося з варіантами на які будемо призначати режими різання.

Варіант I: оброблюваний матеріал – конструкційна сталь.

Характер отвору – наскрізний; шліфувальний $v=30\text{м/с}$; діаметр отвору - $d=30\text{мм}$; довжина шліфування – $L_{\text{шл}}=40\text{мм}$; швидкість різання - $V_{\text{кр}}=30\text{м/с}$.

Визначимо число обертів шліфувального круга, яке відповідає вибраному значенню швидкості різання:

$$n_{кр} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot V_{кр}}{\pi \cdot D} \quad (3.7)$$

де $n_{кр}$ - частота обертання шліфувального круга, об/хв; $V_{кр}$ - швидкість круга, м/с; D - діаметр круга, мм.

$$n_{кр} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot 30}{3.14 \cdot 26} = 22048 \text{ об/хв.}$$

Оскільки, ми маємо безступінчасте регулювання, то приймаємо $n=22000$ об/хв.

Визначимо фактичну швидкість круга:

$$V_{\Phi} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{кр}}{1000 \cdot 60} = \frac{3.14 \cdot 26 \cdot 22000}{1000 \cdot 60} = 29.93 \frac{\text{м}}{\text{с}} \quad (3.8)$$

Визначимо швидкість обертання деталі в м/хв і число обертів деталі за хвилину n .

Приймаємо швидкість різання $V=5$ м/хв.

Визначаємо частоту обертання шпинделя:

$$n_{кр} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 5}{3.14 \cdot 30} = 53 \frac{\text{об}}{\text{хв}} \quad (3.9)$$

Приймаємо $n=53$ об/хв.

Визначаємо фактичну швидкість:

(3.10)

Варіант II: Оброблюваний матеріал - конструкційна сталь.

Характер отвору - наскрізний.

Шліфувальний круг - Э9А40СМ5-8К; швидкість круга - $V_{кр}=30$ м/с;
діаметр отвору - $d=100$ мм; діаметр круга - $D=80$ мм.

Визначимо число обертів круга $n_{кр}$:

$$n_{кр} = \frac{1000 \cdot 60 \cdot 30}{3.14 \cdot 80} = 7165.6 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Приймаємо $n_{кр}=7165,6$ об/хв.

Визначимо фактичну швидкість круга:

Визначимо швидкість обертання деталі V в м/хв і число обертів деталі n в об/хв.

Приймаємо швидкість обертання деталі $V=16$ м/хв.

Тоді, частота обертання деталі:

$$n_{кр} = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot D} = \frac{1000 \cdot 16}{3.14 \cdot 100} = 50.95 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

Приймаємо $n=50$ об/хв.

Визначимо фактичну швидкість обертання деталі V_{ϕ} :

$$V_{\phi} = \frac{\pi \cdot D \cdot n_{кр}}{1000} = \frac{3.14 \cdot 100 \cdot 50}{1000} = 15.7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Що до шліфування чавунів, то обробка проводиться орієнтовно на ідентичних режимах різання, з можливою невеликою корекцією.

Визначимо силові характеристики процесу різання (сили різання P_x , P_y , P_z та потужність різання $N_{різ}$).

$$N_i = C_N \times V_s^r \times S_p^y \times d_s^q \times b^z \quad (3.11)$$

де d - діаметр шліфування, мм;

b - ширина шліфування, мм.

$d=30$ мм; $b=40$ мм.

$C_N=0,27$; $r=0,5$; $x=0,4$; $y=0,4$; $q=0,3$; $S=0.09$ мм/об; $V=4.99$ м/хв.

Тепер,

$$N_i = 0.27 \cdot 4.99^{0.5} \cdot 0.09^{0.4} \cdot 30^{0.3} \cdot 40^1 = 1.73 \text{ кВт}$$

Сили різання в даному випадку визначаються виходячи із потужності різання (сила P_z), а сили P_x і P_y в процентному відношенні до сили P_z .

РОЗДІЛ 4

КОНСТРУКТОРСЬКИЙ РОЗРАХУНОК

4.1. Оптимізація компоновочної схеми проектованого верстата

4.1.1. Обґрунтування модуля верстата (МК, ТМ, КМ).

Спеціалізований внутрішньо-шліфувальний - верстат призначений для виконання наступних операцій: - обробка внутрішніх циліндричних, конічних, та торцевих поверхонь.

Найменший склад блоків компоновки, необхідний для виконання операцій формоутворення називається технологічним модулем (ТМ). Він складається щонайменше з двох блоків – рухомого і стаціонарного, без цього неможливий відносний рух заготовки і інструменту.

Для відпрацювання відповідної характеристики – коефіцієнта використання структури компоновки – необхідно ввести поняття модульного комплекту (МК), який враховував би установчі блоки. МК – це найменший склад блоків для виконання операцій обробки на універсальному верстаті, в склад якої входять блоки формоутворюючих рухів і доповнюють їх по другим координатам установчі блоки.

Оскільки, виходячи із схеми формоутворення обертвий різання S_h надається заготовці, то він буде спільним для всіх компоновок і його можна винести за знак матриці. Рухи d , u з конструктивних міркувань не можуть належати до гілки інструменту, тому їх також виносять за знак матриці.

До даного технологічного модуля входять наступні складові

$$ТМ = \{Ch, O, Z, X\}$$

4.1.2. Побудова загальної матриці компоновки верстата.

Металорізальні верстати найбільш різноманітні із всіх технологічних машин їх розрізняють по технологічному призначені, інструменту, по розмірах, типових різновидностях, по системі керування, по системі автоматизації, по компоновках.

Розробці компоновки передуює конструювання окремих вузлів. Компоновка верстату забезпечує виконання всіх формоутворюючих рухів, та передбачає можливість здійснення інших виконавчих рухів на верстаті. Вона має блочну структуру і складається з одного стаціонарного вузла і декількох рухомих блоків, які відокремлені один від одного лінійними, або круговими направляючими.

Компоновка – це система розміщення вузлів і направляючих верстату, які характеризуються структурою, пропорціями і властивостями.

Побудова компоновки верстату є важливим етапом в його створенні і має свої послідовні етапи:

- технологічна компоновка (визначення необхідного складу виконавчих рухів, визначення кількості шпинделів у верстаті, ступінь їх універсальності, форма централізованої обробки, число робочих і завантажувальних позицій у відповідності до технологічного завдання);

- координатна компоновка (визначення складу і порядок сполучення координатних рухів у верстаті);

- базова компоновка (визначає тип верстата по видах базових вузлів та інших ознаках);

- конструктивна компоновка (уточнює конструктивну виконання верстата деякі її особливості).

Склад елементарних формоутворюючих і додаткових рухів і зв'язків між цими рухами визначають кінематичну структуру верстата, яка є основою побудови компоновки і всієї конструкції. Обумовленість кінематичної структури верстата і його компоновки взаємна.

Залежність від компоновки верстата розміщення елементарних рухів між заготовкою і ріжучим інструментом здійснює суттєвий вплив на структурно кінематичний зв'язок. Але кінематична структура верстата є первинним фактором, а компоновка вторинним.

В основному аналіз структури компоновок металорізальних верстатів любых типів повинна бути покладена кінематична структура – склад

елементарних рухів, виконуваних їх робочими органами. Такий підхід до спостереження дозволить розкрити структуру компоновки, як внутрішній склад, органічно зв'язане з призначенням.

Формалізація компоновок повинна розкривати структуру верстата, дозволяти судити про розміщення окремих блоків, а також давати можливість використання того чи іншого апарату досліджень.

Структурна формула компоновки верстата – це певна послідовність символів, які означають блоки і яка розкриває координатну причетність їх і методів спряження.

Кількісний аналіз структури компоновок базується на числах блоків і елементарних рухів, покладених в компоновці і переслідує ціль оцінки структурної універсальності і ступеня можливості її використання.

Звідси запишемо загальну матрицю можливих компоновок у верстаті.

$$A = C_{hd} u \{O, Z, X\}e \quad (4.1)$$

Кількість можливих компоновок становить:

$$K=3!=6$$

Тепер представимо матрицю можливих компоновок в розгорнутому вигляді:

$$A=C_{hd}u \left| \begin{array}{ccc} XZO & XOZ & OXZ \\ ZXO & XOZ & OZX \end{array} \right| \quad (4.2)$$

Представимо всі можливі варіанти компоновальних схем, які включає в себе матриця (рис. 4.1):

4.1.3. Вибір верстатів-аналогів.

Що до вибору верстатів-аналогів, то до них можна віднести існуючі на даний момент внутрішньо-шліфувальні верстати. А саме: верстат мод. 3A227, мод. 3A251 та мод. 3K227В. Розглянемо їх детальніше.

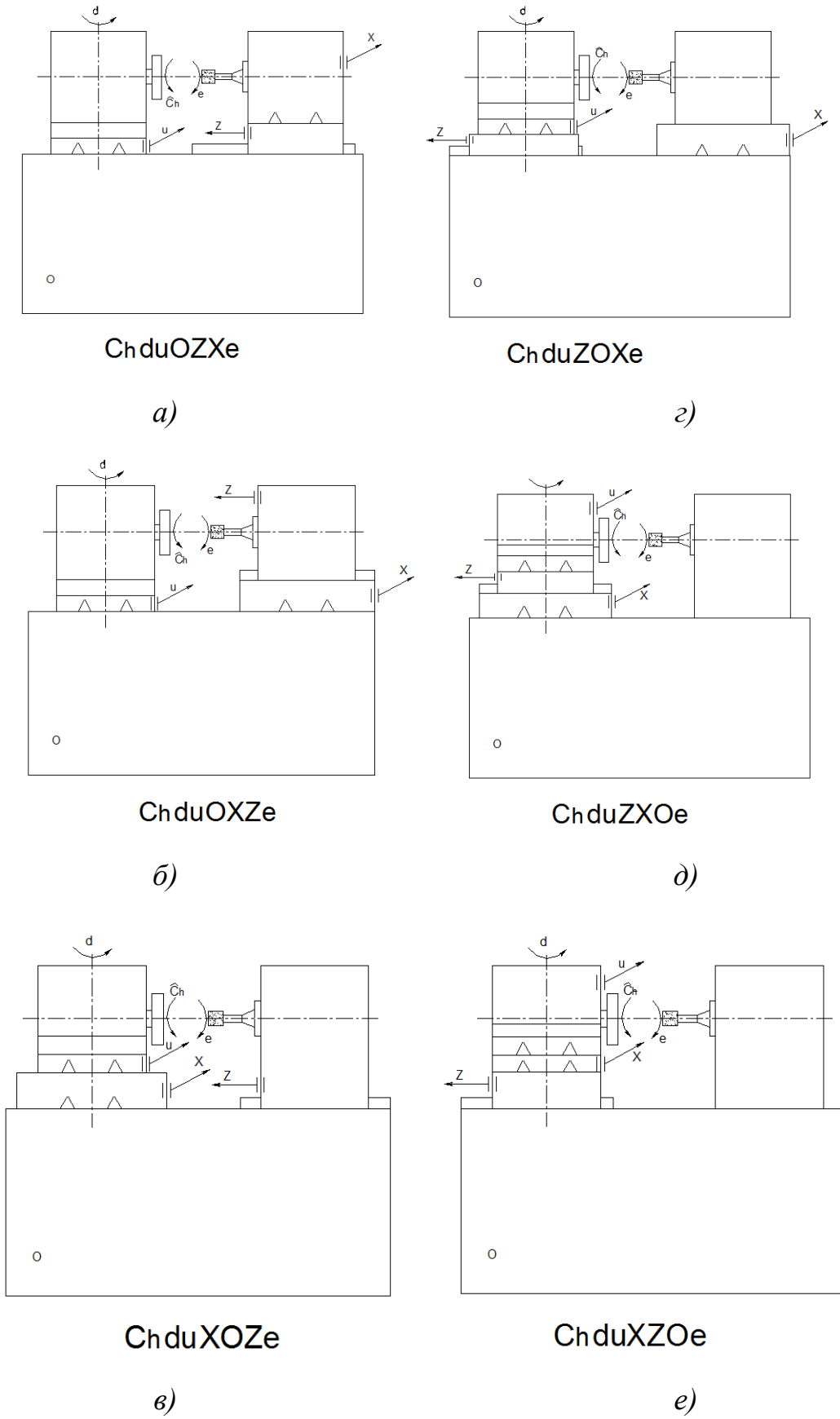


Рисунок 4.1 Схеми компоновок верстата

Так універсальний внутрішньо-шліфувальний верстат 3A227 (рис. 4.2) призначений для шліфування циліндричних і конічних отворів і має торцешліфувальне пристосування, яке дає можливість шліфувати з одного установа її зовнішній торець і циліндричний або конічний отвори. Верстати застосовують на машинобудівних заводах з дрібносерійним і серійним виробництвом, а також в інструментальних і ремонтних цехах заводу. Шліфування деталей здійснюється за допомогою наступних рухів: обертання шліфувального круга і деталі, поперечна подача деталі, поздовжня подача шліфувального круга. При роботі з торцешліфувальним пристосуванням необхідні наступні рухи: обертання круга і деталі і подача круга вздовж власної осі.

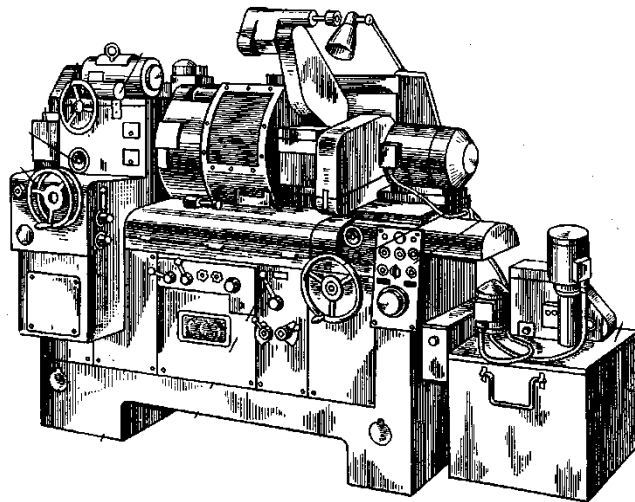


Рисунок 4.2 Універсальний внутрішньо-шліфувальний верстат 3A227

Внутрішньо-шліфувальний напівавтомат мод. 3A251 (рис. 4.3) призначений для шліфування наскрізних отворів діаметром 50...100 мм при найбільшій довжині 200 мм. Верстат оснащений гідравлічним приводом поздовжнього переміщення стола, що допускає безступінчасте регулювання переміщення в межах 0,3...10 м/хв. частота обертання бабки виробу також регулюється безступенево в межах 130...500 об/хв. Найбільший діаметр шліфувального круга 80 мм при найбільшій висоті 50 мм. Частота обертання шпинделя шліфувального круга 3550...10000 об/хв. потужність електродвигуна приводу шліфувального круга $N=4,5$ кВт.

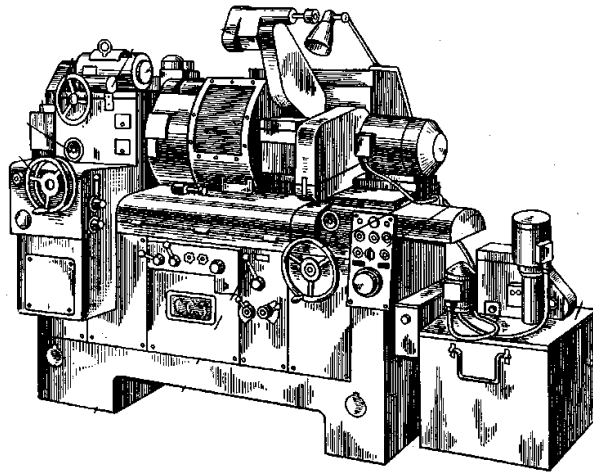


Рисунок 4.3 Внутрішньо-шліфувальний напівавтомат 3А251

Універсальний внутрішньо-шліфувальний верстат 3К227В (рис. 4.4). Шліфування деталей здійснюється наступними рухами: обертання шліфувального круга і деталі, поперечна подача деталі, поздовжня подача шліфувального круга. При роботі з торцешліфувальним пристосуванням необхідні наступні рухи: обертання круга і деталі і подача круга поздовж власної осі.

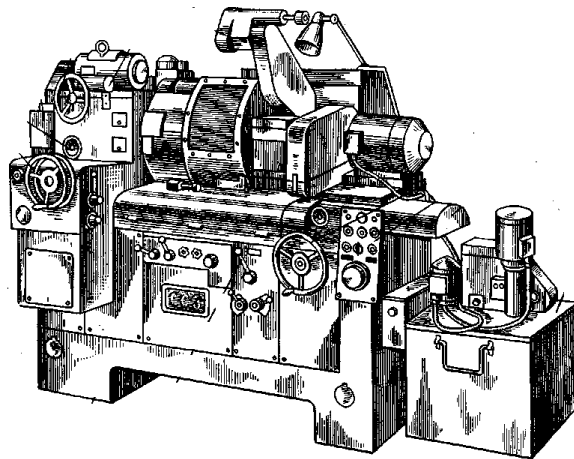


Рисунок 4.4 Універсальний внутрішньо-шліфувальний верстат 3К227В

4.1.4. Вибір оптимальної схеми компоновки.

Вибір оптимальної схеми компоновки полягає в тому, що необхідно із загальної кількості можливих і не можливих компоновок, що включає в себе матриця варіантів компоновок вибрати одну або декілька реальних компоновальних схем, які будуть бажаними.

Оптимальна схема компоновки повинна містити в собі максимально необхідну кількість блоків, які забезпечать всі необхідні рухи різання, а також допоміжні рухи.

Для забезпечення вище обумовленого вводиться таке поняття, як умови відбору та структурні ознаки. Структурні ознаки відбору компоновок ґрунтуються на технологічних та конструктивних міркуваннях.

Для зменшення кількості можливих компоновок і вибору оптимальної компоновальної схеми на матрицю можливих компоновок накладемо умови відбору.

Умови відбору:

- найбільш рухомий блок повинен прилягати до стаціонарного в гільці інструмента:

$$M1 = \Phi + XOZ + OZX; \quad (4.3)$$

- переміщення надається тільки інструменту:

$$M2 = \Phi + \Phi + OOO; \quad (4.4)$$

- поперечно рухомий блок повинен бути як найбільш віддалений від стаціонарного:

$$M3 = XZO + \Phi + OZX. \quad (4.5)$$

Математичний вибір можливих компоновок верстата. Попередньо сформульовані умови відбору у вигляді структурних формул записують у матричному вигляді. При співпаданні умов (перетин множин) отримуємо бажану компоновку.

Виходячи із результатів відбору можна записати наступні формули компоновок.

$$\begin{aligned} M1 &= \Phi + XOZ + OZX \\ M2 &= \Phi + \Phi + OOO \\ \underline{M3} &= \underline{XZO + \Phi + OZX}. \end{aligned} \quad (4.6)$$

Отриману компоновку зображено на рисунку 4.5.

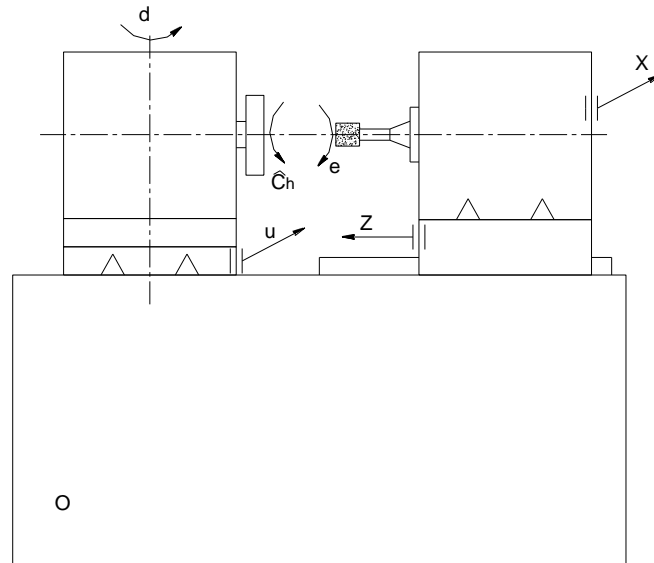


Рисунок 4.5 Оптимальна схема компоновки верстата

4.2. Розробка структурно-кінематичної та кінематичної схем верстата

Кінематична структура внутрішньо-шліфувального верстата представлена на рис. 4.6.

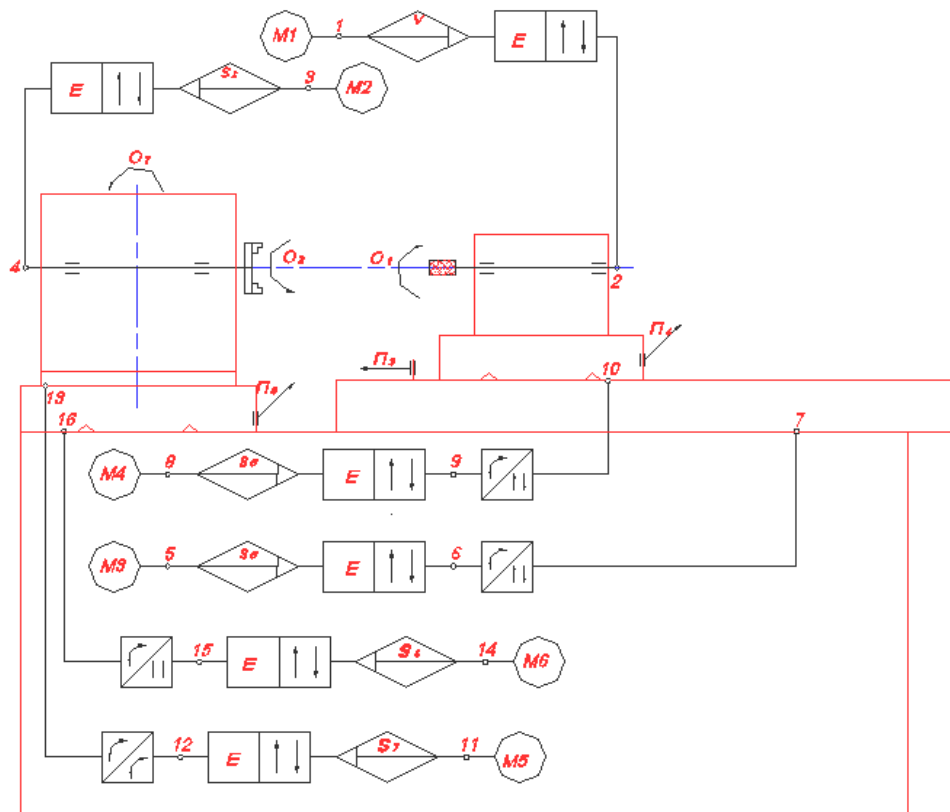


Рисунок 4.6 Структурно - кінематична схема проектованого верстата

Головний рух різання (обертовий рух шпинделя заготовки) забезпечується таким структурно - кінематичним ланцюгом: М2 - 3 - s_2 - Реверс Е - 4 - шпиндель. Обертовий рух шпинделя інструмента забезпечується наступним структурно - кінематичним зв'язком: М1 - 1 - v - Реверс Е - 2 - шпиндель (інструментальний).

На основі розробленої структурно-кінематичної схеми складаємо кінематичну схему верстата. Особливістю кінематичної схеми (рис. 4.7.) є наявність окремих приводів на кожен кінематичний ланцюг верстата.

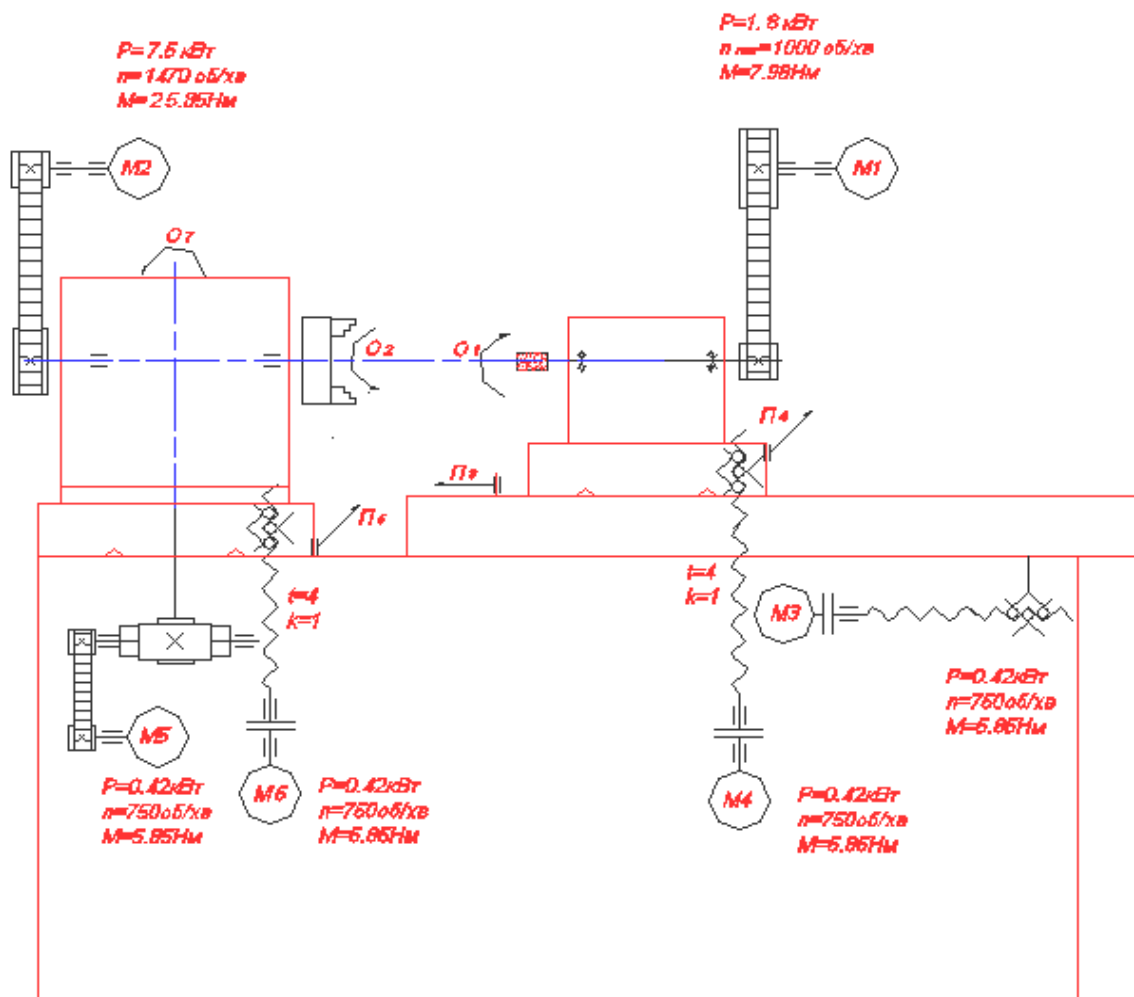


Рисунок 4.7 Кінематична схема верстата

Запропонована конструкція верстата передбачає використання уніфікованих вузлів, та агрегатно-модульний принцип його побудови. Кожен рух який виконується на верстаті супроводжується певними якісними

параметрами та силовими характеристиками які забезпечують виконання певної роботи.

Якісні характеристики забезпечуються кінематикою верстату, а силові характеристики – потужністю джерела енергії, яка повинна враховувати силу різання, сукупні втрати в кінематичному ланцюгу.

Якісні параметри повинні враховувати всі можливі варіанти технологічних операцій, які виконуються на верстаті.

Основними якісними параметрами є верхні та нижні швидкості різання, границі чисел обертів та величина подачі (V_{\min} , V_{\max}), (n_{\min} , n_{\max}), (S_{\min} , S_{\max}) та силові параметри.

4.3. Розробка та розрахунок конструкції приводу інструментального шпинделя

4.3.1. Кінематика приводу.

Привід інструментального шпинделя представлений на рис. 4.8. Він містить всі кінематичні ланки, які необхідні для передачі крутного моменту від джерела (двигуна) до виконавчого органу (шпинделя). В приводі використовується двигун постійного струму. Оберти від двигуна передаються на шпиндель через зубчато-пасову передачу. Таке конструктивне виконання приводу (з вкороченим кінематичним ланцюгом) сприяє підвищенню жорсткості приводу і точності переміщення. Розширюються можливості уніфікації приводів і виконання їх в виді окремих агрегатів (модулів).

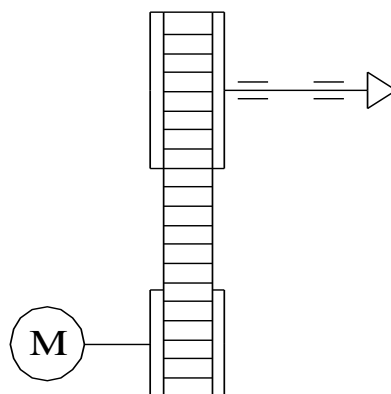


Рисунок 4.8 Привід інструментального шпинделя

4.3.2. Вибір електродвигуна приводу інструментального шпинделя.

Необхідна потужність електродвигуна приводу головного руху (шпинделя) становить:

$$N = \frac{N_{p.\max}}{\eta}, \quad (4.7)$$

де η – к.к.д. ланцюга головного руху.

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2^2 \quad (4.8)$$

η_1 – к.к.д. зубчатої пасової передачі, $\eta = 0.98$;

η_2 – к.к.д. пари підшипників кочення $\eta_2 = 0.995$.

$$\eta = 0.98 \cdot 0.995^2 = 0.97$$

$$N = \frac{1.72}{0.97} = 1.78 \text{ кВт}$$

Використовуючи програму «Вибір електродвигунів приводів головного руху», яка розроблена у «Станкіні» (рис. 4.9), проведемо вибір двигуна для приводу інструментального шпинделя.

При відкритті головного вікна необхідно ввести вхідні дані. Дані для вводу беремо з розрахунків, які проведені в 3 розділі.

Ввівши необхідні дані, та визначивши розрахункову частоту обертання шпинделя отримуємо схему та технічні дані про рекомендований двигун для приводу. Програма запропонувала два варіанти двигунів.



Рисунок 4.9 Вікно програми вибору двигуна приводу верстата

На основі проведеного автоматизованого вибору типорозміру двигуна для приводу інструментального шпинделя використовуємо двигун постійного струму фірми Siemens 1GH5 104 потужністю $N = 1.8 \text{ кВт}$, з максимальною частотою обертання 7000 об/хв. , номінальною частотою обертання 1000 об/хв. ; діапазон регулювання двигуна -7 , маса двигуна – 44 кг .

4.3.3. Автоматизований розрахунок зубчасто-пасової передачі приводу інструментального шпинделя.

Використовуючи програму «Розрахунок зубчастої передачі» проведемо вибір геометричних параметрів для зубчасто-пасової передачі, яка використовується в даному приводі.

Дана програма працює в діалоговому режимі. На запит програми в вікні слід ввести необхідне числове значення параметру.

На цьому розрахунок закінчено, ми отримали необхідні для виконання креслень та розробки вузлів дані.

4.4. Розробка конструкції приводу закріплення заготовки

4.4.1. Кінематика приводу.

Привід головного руху представлений на рис. 4.10. Його конструкція аналогічна конструкції приводу інструментального шпинделя. В приводі використовується двигун постійного струму. Оберти від двигуна передаються на шпиндель через зубчасто-пасову передачу.

Дана конструкція є оптимальною для розроблюваного верстату з точки зору простоти конструкції та зручності керування.

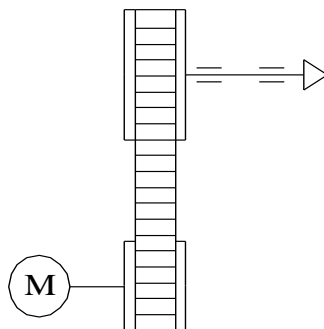


Рисунок 4.10 Привід головного руху

4.4.2. Вибір електродвигуна приводу головного руху.

Необхідна потужність електродвигуна приводу головного руху (шпинделя) становить:

$$N = \frac{N_{p.\max}}{\eta},$$

де η – к.к.д. ланцюга головного руху.

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2^2$$

η_1 – к.к.д. зубчастої пасової передачі, $\eta = 0.98$;

η_2 – к.к.д. пари підшипників кочення $\eta_2 = 0.995$.

$$\eta = 0.98 \cdot 0.995^2 = 0.97 \text{ кВт}$$

$$N = \frac{6.27}{0.97} = 6.5 \text{ кВт}$$

Обираємо для приводу головного руху електродвигун постійного струму потужністю $N = 7.5 \text{ кВт}$, частота обертання $n = 1470 \text{ об/хв}$.

Характеристика електродвигуна:

Потужність – 7.5 кВт ;

Максимальна частота обертання - 5000 об/хв ;

Момент інерції - $0,056 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$; Маса - 97 кг ;

4.4.3. Розрахунок зубчасто-пасової передачі.

При виборі зубчасто-пасової передачі керуємося частотою обертання шпинделя і величиною навантаження. Розрахунок проводимо по [14].

В залежності від потужності $N_1 = 7.5 \text{ кВт}$ та кількості обертів ведучого шківів $n_1 = 5000 \text{ об/хв}$ по [14] вибираємо модуль зубчатого пасу $m = 5 \text{ мм}$ і визначаємо крок пасу:

$$p = \pi \cdot m = 3.14 \cdot 5 = 15.71 \text{ мм.} \quad (4.9)$$

Визначаємо передаточне відношення та кількість зубів шківів зубчасто-пасової передачі:

$$u = \frac{n_1}{n_2} = \frac{5000}{4460} = 1.12.$$

Приймаємо: $u = 1.4$, $z_1 = 25$, $z_2 = z_1 \cdot u = 25 \cdot 1.4 = 35$.

Розраховуємо ділильні діаметри шківів:

$$d = m \cdot z, \text{ мм} \quad (4.10)$$

$$d_1 = m \cdot z_1 = 5 \cdot 25 = 125 \text{ мм}, \quad d_2 = m \cdot z_2 = 5 \cdot 35 = 175 \text{ мм}.$$

Визначаємо швидкість паса:

$$v = \frac{\pi \cdot d_1 \cdot n_1}{1000 \cdot 60} = \frac{3,14 \cdot 125 \cdot 5000}{1000 \cdot 60} = 32,7 \text{ м/с}. \quad (4.11)$$

Приймаємо попередню міжосьову відстань з умови:

$$a \geq 0.5 \cdot (d_2 + d_1) = 0.5 \cdot (175 + 125) = 150 \text{ мм}. \quad (4.12)$$

Приймаємо $a = 500 \text{ мм}$.

Визначаємо довжину паса в кроках:

$$L_p = \frac{2 \cdot a}{p} + \frac{z_1 + z_2}{2} + \left(\frac{z_2 - z_1}{2 \cdot \pi} \right)^2 \cdot \frac{p}{a} \quad (4.13)$$

$$L_p = \frac{2 \cdot 500}{15.71} + \frac{25 + 35}{2} + \left(\frac{35 - 25}{2 \cdot 3.14} \right)^2 \cdot \frac{15.71}{500} = 93.7.$$

По ГОСТ 38.051114-76 приймаємо $L_p = 100$ кроку.

Визначаємо остаточну відстань між осями шківів:

$$a = \frac{p}{4} \cdot \left[L_p - \frac{z_1 + z_2}{2} + \sqrt{\left(L_p - \frac{z_1 + z_2}{2} \right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{z_2 - z_1}{2 \cdot \pi} \right)^2} \right], \text{ мм} \quad (4.14)$$

$$a = \frac{15.71}{4} \cdot \left[100 - \frac{25 + 35}{2} + \sqrt{\left(100 - \frac{25 + 35}{2} \right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{35 - 25}{2 \cdot 3.14} \right)^2} \right] = 550 \text{ мм}.$$

Визначимо кут обхвату малого шківа:

$$\alpha_1 = 180^\circ - \frac{57^\circ \cdot (d_2 - d_1)}{a} \quad (4.15)$$

$$\alpha_1 = 180^\circ - \frac{57^\circ \cdot (175 - 135)}{550} = 175^\circ.$$

Знаходимо кількість зубів пасу, які знаходяться в зачепленні з меншим шківом:

$$z_0 = \frac{z_1 \cdot \alpha_1}{360^\circ}, \quad (4.16)$$

$$z_0 = \frac{25 \cdot 175^\circ}{360^\circ} = 12.2 > [z_0] = 6.$$

Визначаємо допустиму граничну колову силу:

$$[K] = [K_0] \cdot C_p \cdot C_F - q \cdot v^2, \text{ Н/мм} \quad (4.17)$$

де $[K_0]$ - допустима приведена гранична колова сила, $[K_0] = 35 \text{ Н/мм}$ [44]; C_p - коефіцієнт динамічності навантаження і режиму роботи. При змінному реверсивному навантаженні і роботі в дві зміни $C_p = 0.51$; C_F - коефіцієнт, який враховує нерівномірність розподілення навантаження між проводками тросу, $C_F = 0.85$;

$$q - \text{маса 1 м паса шириною 1 мм, } q = 0.007 \frac{\text{кг}}{\text{м} \cdot \text{мм}}.$$

$$[K] = 35 \cdot 0.51 \cdot 0.85 - 0.007 \cdot 32.7^2 = 7.68 \text{ Н/мм}.$$

Знаходимо колову силу:

$$F_t = \frac{N_1}{v} = \frac{7500}{32.7} = 230 \text{ Н}. \quad (4.18)$$

Розраховуємо ширину паса:

$$b \geq \frac{F_t}{[K]} = \frac{230}{7.68} = 30.0 \text{ мм}. \quad (4.19)$$

За стандартом приймаємо $b = 32 \text{ мм}$.

Знаходимо силу попереднього натягу віток паса:

$$F_0 = 1.2 \cdot b \cdot q \cdot v^2 = 1.2 \cdot 32 \cdot 0.007 \cdot 32.7 = 288 \text{ Н}. \quad (4.20)$$

Знайдемо силу, яка діє на вали:

$$F_n = 1.1 \cdot F_t = 1.1 \cdot 230 = 253 \text{ Н}. \quad (4.21)$$

Визначимо габаритні розміри шківів:

діаметри кіл вершин зубів:

$$d_a = d - 2 \cdot t + c, \text{ мм} \quad (4.22)$$

де t – відстань від впадини зуба паса до осьової лінії троса, $t = 1.3$ мм;
 c – поправка, яка враховує податливість витків троса $c = 0.1$.

ведучого шківа:

$$d_{a1} = d_1 - 2 \cdot t + c = 125 - 2 \cdot 1.3 + 0.1 = 122 \text{ мм};$$

веденого шківа:

$$d_{a2} = d_2 - 2 \cdot t + c = 175 - 2 \cdot 1.3 + 0.1 = 172 \text{ мм};$$

діаметри кіл впадин зубів:

$$d_f = d_a - 2 \cdot h_u, \text{ мм} \quad (4.23)$$

де h_u – висота зубів шківа, $h_u = 5.0$ мм [44]

ведучого шківа:

$$d_{f1} = d_{a1} - 2 \cdot h_u = 122 - 2 \cdot 5.0 = 112 \text{ мм};$$

веденого шківа

$$d_{f2} = d_{a2} - 2 \cdot h_u = 172 - 2 \cdot 5.0 = 162 \text{ мм};$$

ширина шківа:

$$B = b + t = 32 + 5 = 37 \text{ мм}, \quad (4.24)$$

приймаємо $B = 36$ мм по [44].

4.5. Розрахунок тягового пристрою приводу подач

Передачі гвинт-гайка кочення в приводах подач верстатів з ЧПК знайшли широке застосування завдяки ряду переваг в порівнянні з гвинтовими парами ковзання. Гвинтові пари кочення мають високий ККД, коефіцієнти тертя спокою і тертя руху близькі один до одного по значенню, сили тертя не залежать від швидкості руху. При вибиранні зазору утворюється беззазорна передача з достатньо високою осьовою жорсткістю.

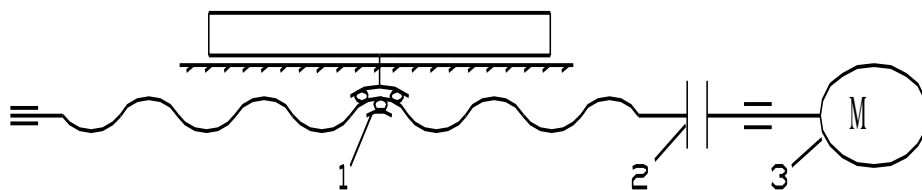


Рисунок 4.11 Схема приводу

Привід подач представляє собою передачу 1 гвинт-гайка кочення, що приводиться в рух через сильфонну муфту 2 від високомоментного асинхронного двигуна 3. Передача дозволяє здійснювати рух (повздовжній або поперечний) вузлів верстат.

Розрахунок і вибір електродвигуна.

Визначення частоти обертання.

Максимальна робоча частота обертання:

$$n_{ш.х.} = \frac{V_{ш.х.} \cdot i_p}{t_z}$$

де $V_{ш.х.}$ - швидкість швидкого ходу; $V_{ш.х.} = 10000$ мм/хв;

i_p - передаточне відношення коробки швидкостей (відсутня); $i_p = 1$;

t_z - крок гвинта; $t_z = 10$ мм.

$$n_{ш.х.} = \frac{10000 \cdot 1}{10} = 1000 \text{ об/хв.}$$

Мінімальна частота обертання:

$$n_{роб.мин.} = \frac{V_{роб.мин.} \cdot i_p}{t_z}$$

де $V_{роб.мин.}$ - мінімальна робоча швидкість; $V_{роб.мин} = 10$ мм/хв; i_p - передаточне відношення коробки швидкостей (відсутня); $i_p = 1$; t_z - крок гвинта; $t_z = 10$ мм.

$$n_{роб.мин} = \frac{10}{10} = 1 \text{ об/хв.}$$

4.6. Конструювання та розрахунок шпиндельного вузла для заготовки

Передня опора шпинделя складається з дворядного роликотідшипника з короткими циліндричними роликами з конусним посадочним отвором внутрішнього кільця 1:12 і аксіально-упорного двохрядного кулькового підшипника.

Задня опора шпindelного вузла також складається з дворядного роликopідшипника з короткими циліндричними роликами.

При конструюванні ШВ користуємося такими залежностями:

$$c \leq d, \quad l \approx (2.5 - 6) \cdot d;$$

де c - виліт шпинделя;

d - діаметр шийки в передній опорі;

l - міжопорна відстань.

Приймаємо: $d = 80$ мм, $c = 40$ мм, $l = 300$ мм.

Параметр швидкохідності шпindelного вузла:

$$d_{n \max} = 2.5 \cdot 10^5 \text{ мм} \cdot \text{хв}.$$

Даний шпindelний вузол належить до середньошвидкохідних шпindelів.

РОЗДІЛ 5

НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

Загальна характеристика способу обробки полігональних отворів.

Найбільшу групу способів обробки полігональних поверхонь реалізують пристрої, що використовують налаштовані кінематичні ланцюги.

Суть більшості цих способів полягає в тому, що кожна кромка різального інструменту описує відносно заготовки циклоїдальну криву, яка і є утворенням полігонального контуру.

Для пояснення суті розглянемо спосіб призначений для обробки різанням полігональних отворів шляхом комбінації обертальних рухів інструменту та заготовки навколо паралельних за а.с. НРБ № 47221 [45].

Обробка полігонального отвору ведеться багатолезовим осьовим інструментом типу зенкера тільки по попередньо обробленому отвору в заготовці.

Заготовка 1 (рис. 5.1) з попередньо обробленим круглим отвором А обертається навколо своєї вісі із сталою кутовою швидкістю ω_1 .

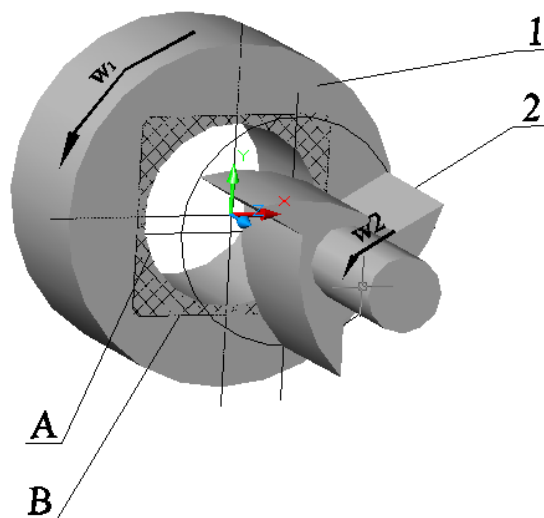


Рисунок 5.1 Спосіб обробки полігональних отворів:

1 – заготовка, 2 – інструмент; А – попередньо оброблений отвір в заготовці, Б – контур оброблюваного полігонального отвору

Інструмент 2 типу зенкер, радіусом R обертається навколо своєї вісі із сталою кутовою швидкістю ω_2 , причому швидкості інструменту і заготовки зв'язані жорстким кінематичним співвідношенням, яке залежить від числа граней оброблюваного отвору. Осі інструменту і заготовки паралельні і розташовані на відстані e (ексцентриситет) один від одного. Подача S інструменту здійснюється вздовж його вісі.

Під час обробки заготовка обертається з постійною кутовою швидкістю ω_1 . Інструмент з радіусом R_1 також обертається, але із кутовою швидкістю ω_2 , яка є одного напрямку із ω_1 , але перевищує її на певну постійну величину.

Осі інструменту та заготовки паралельні і рознесені в просторі на величину ексцентриситету e . Подача S інструменту здійснюється вздовж осі.

Спосіб доцільно використовувати на токарних автоматах та напівавтоматах через наявність, у останніх приводів обертання та незалежної подачі інструменту, або на верстатах з ЧПК, які мають розділений привід та хрестовий супорт.

Форму та розміри оброблюваного полігонального отвору визначають значення кутових швидкостей ω_1 і ω_2 заготовки та інструменту (власне, їх співвідношення), величини радіусу R_1 інструменту та ексцентриситету e .

Кількість різальних кромки інструменту на одиницю менша за кількість граней оброблюваного полігонального отвору.

Для подальших розрахунків необхідно визначитися з системами координат.

Для зручності використовуємо традиційне позначення координат у відповідності до напрямків складових сил різання P_Z, P_Y, P_X .

Перехід «традиційні координати \rightarrow міжнародні координати» здійснюється таким чином: $X \rightarrow Z, Y \rightarrow X, Z \rightarrow Y$.

Ми будемо використовувати дві системи координат. Система координат X_1, Y_1, Z_1 пов'язана з робочим шпинделем верстату. Напрямок координатних осей обирається за правилом «правої руки», згідно з яким вісь X_1 (на рис. не

показана) спрямована перпендикулярно площині аркуша до спостерігача. Початком цієї системи координат є точка O_1 .

Система координат робочого шпинделя є домінуючою, тому осі X_2, Y_2, Z_2 системи координат, пов'язаної з інструментальним шпинделем, спрямовані аналогічно, за виключенням того, що початок O_2 цієї системи координат лежить на осі обертання інструменту. Вісь X_2 на рис. 5.1. також не показана.

На рис. 5.2. зображені стадії утворення чотиригранного полігонального отвору при обертанні в ньому інструменту з трьома різальними кромками (для стилізації інструмент зображений у вигляді рівностороннього трикутника).

На рисунку позначені точки K_1 і K_2 . Точка K_1 нерухомо з'єднана з заготовкою, а точка K_2 знаходиться в вершині різальної кромки інструменту, що прийнята нами за першу (тобто по ній відраховується кут повороту інструменту). На рис. 5.3 а), зображено початкове положення інструменту та заготовки.

Кути φ_1 та φ_2 характеризують положення в просторі відповідно заготовки та інструменту. Відрізок K_1K_2 – ділянка полігонального профілю, що обробляється першою різальною кромкою.

З рис. 5.2 видно, що інструмент та заготовка обертаються в одному напрямку (проти годинникової стрілки). Проте, частота обертання інструменту перевищує частоту обертання заготовки, завдяки чому і утворюються швидкість різання.

Швидкості (частоти) обертання інструменту та заготовки відповідають такому співвідношенню.

$$\begin{aligned} \frac{\text{Швидкість обертання інструменту}(\omega_2)}{\text{Швидкість обертання заготовки}(\omega_1)} &= \\ &= \frac{\text{Кількість граней оброблюваного отвору}(m)}{\text{Кількість різальних кромок інструменту}(n)} \end{aligned}$$

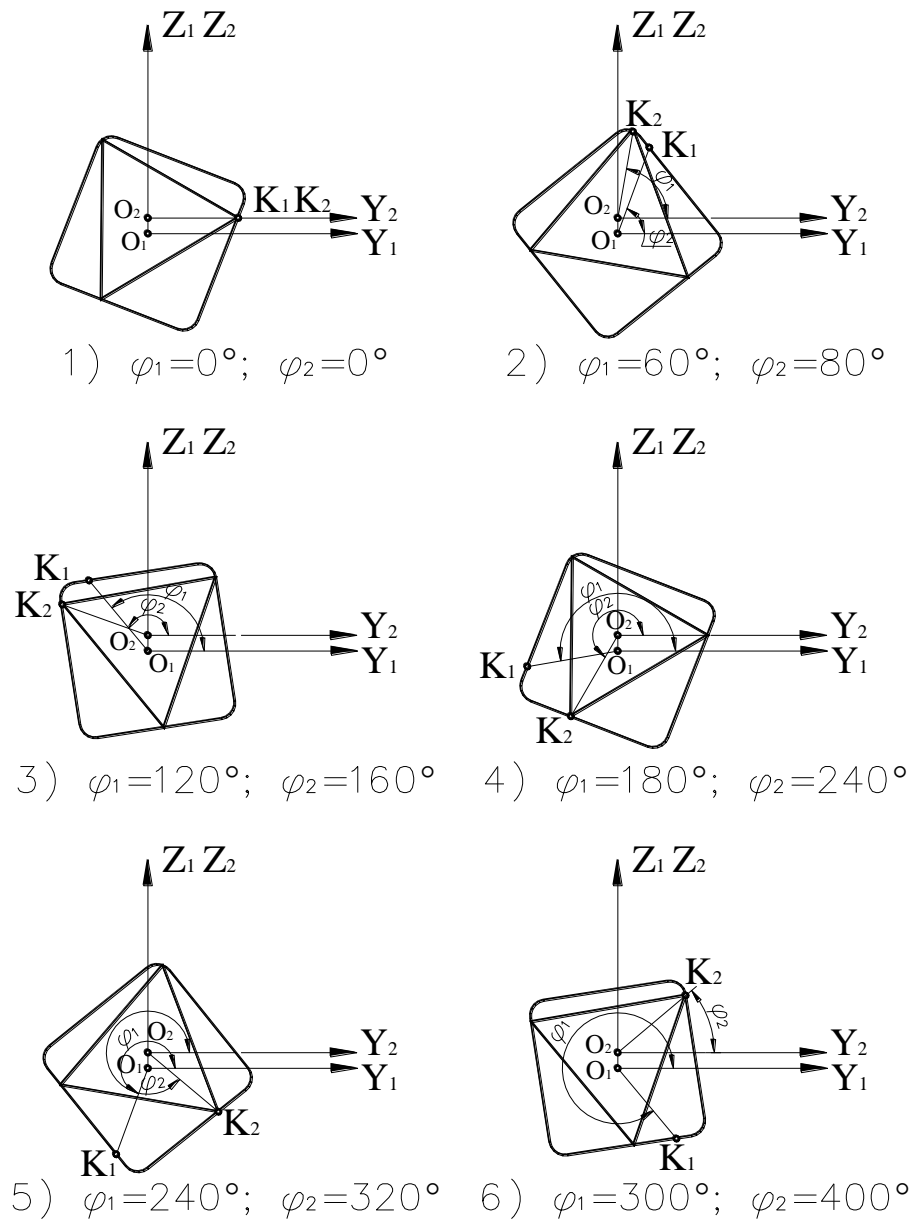


Рисунок 5.2 Стадії процесу утворення полігональної поверхні

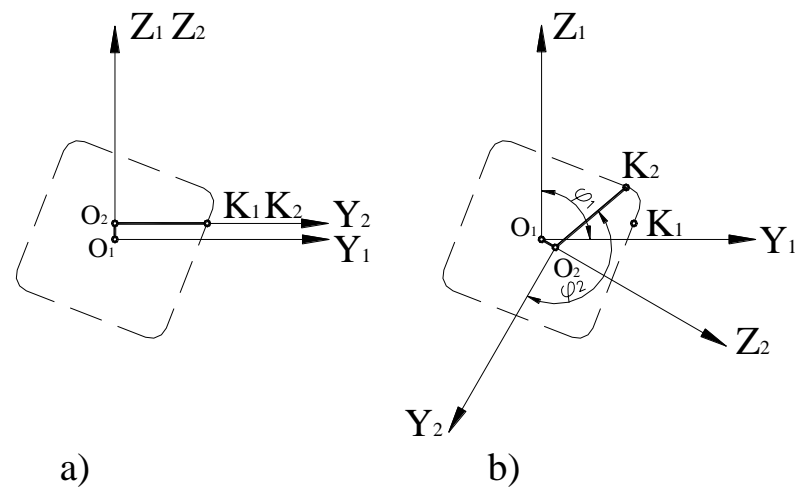


Рисунок 5.3 Схема до визначення закону руху різальної кромки інструменту

Для визначення закону руху різальної кромки інструменту в просторі скористаємося розрахунковою схемою, що зображена на рис. 5.3.

На рис. 5.3, а зображено початкове положення інструменту та заготовки.

Зупинимо обертання заготовки шляхом надання системі обертання навколо осі заготовки з частотою, що рівна за модулем, але протилежна за напрямком частоті обертання заготовки. Тоді заготовка зупиниться, а інструмент отримає додаткове (переносне) обертання навколо осі деталі, здійснюючи планетарний рух. Положення осі інструменту в просторі характеризуватиметься кутом $\varphi'_1 = -\varphi_1$. Згідно розрахункової схеми (рис. 5.3, б) і враховуючи, що $O_1O_2 = e$ та $O_2K_2 = R_1$, параметричні рівняння траєкторії руху загальної кромки в системі координат заготовки матимуть вигляд:

$$\begin{cases} y = e \cdot \cos(\varphi'_1) + R_1 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi'_1) \\ z = e \cdot \sin(\varphi'_1) + R_1 \cdot \sin(\varphi_2 - \varphi'_1) \end{cases} \quad (5.1)$$

Вище було зазначено співвідношенням частот обертання інструменту та заготовки. Тому для кутів повороту інструменту та заготовки запишемо:

$$\frac{\varphi'_1}{\varphi_2} = -\frac{n}{m} \quad (5.2)$$

де m – кількість граней оброблюваного полігонального отвору;
 $n = m - 1$ – кількість різальних кромки інструменту.

Переходячи до незалежного параметру – кута φ_1 повороту заготовки та враховуючи (5.2), система параметричних рівнянь (5.1) прийме вигляд:

$$\begin{cases} y = e \cdot \cos(\varphi_1) + R_1 \cdot \cos\left[\left(\frac{m}{n} - 1\right) \cdot \varphi_1\right] \\ z = -e \cdot \sin(\varphi_1) + R_1 \cdot \sin\left[\left(\frac{m}{n} - 1\right) \cdot \varphi_1\right] \end{cases} \quad (5.3)$$

Отримана система є системою параметричних рівнянь математичної кривої вищого порядку подовженої гіпоциклоїди.

Хоча система (5.3) задовольняє нескінченній множині значень e та R_1 , проте нас цікавлять такі їх значення, при яких утворюваний гіпоциклоїдний профіль максимально наближається до правильного багатогранника.

Це, а також інші питання, пов'язані з геометричними та кінематичними характеристиками способу обробки полігональних отворів, розглянемо далі.

ВИСНОВКИ І ПРОПОЗИЦІЇ

1. Пошук, обґрунтування, оцінку і вибір схеми верстата для обробки профільних поверхонь слід проводити з урахуванням конкретних умов виробництва, що дозволить максимально використовувати його технологічні можливості та досягнути високих техніко-економічних показників. Оскільки формоутворення профільних поверхонь є складним процесом, то різноманітні схеми обробки є об'єктом вивчення нашого дослідження.

2. Інформаційно-патентний аналіз використання профільних поверхонь показав, що вони можуть використовуватись: для передачі крутильного моменту; для забезпечення необхідного руху вихідної ланки (кулачкові механізми); передачі обертального руху; в об'ємних машинах і пристосуваннях; в якості опор ковзання (багатоклинові гідродинамічні підшипники); та в спеціальних затискних механізмах.

3. Проведений аналіз існуючих способів і технологічного обладнання для обробки полігональних поверхонь показав, що їх можна класифікувати за рядом основних ознак, а саме по принципу перетворення інформації; принципу перетворення енергії та рівню автоматизації обладнання.

4. Найбільшу групу способів обробки полігональних поверхонь реалізують пристрої, що використовують налаштовані кінематичні ланцюги. Суть більшості цих способів полягає в тому, що кожна кромка різального інструменту описує відносно заготовки циклоїдальну криву, яка і є утворенням полігонального контуру.

5. Багато способів працюють з використанням механізмів-побудовувачів. В них вихідна ланка механізму рухається вздовж лінії, яка подібна до оброблюваної полігональної поверхні. В склад такого механізму входять універсальні елементи: важільні, кулісні зубчасті механізми тощо.

6. Проведено порівняльний аналіз декількох варіантів технологічного процесу, здійснено вибір раціонального маршруту обробки деталі. Аналітичними та табличними методами призначено режими різання.

7. Проведено вибір раціональної компоновки верстата, розроблено структурно-кінематичну та кінематичну схему верстата.

8. На основі розробленої кінематичної схеми здійснено розробку конструкцій основних виконавчих вузлів верстату, а саме приводу інструментального шпинделя, приводу головного руху, тягового механізму.

9. При розрахунку приводу інструментального шпинделя використовувались спеціальні програми, які дозволили провести вибір типу електродвигуна та здійснити автоматизований розрахунок зубчасто-пасової передачі.

10. Досліджено геометричні та кінематичні характеристики способу обробки полігональних отворів, побудовано графіки, які характеризують утворення профільних поверхонь однією різальною кромкою інструменту при різних незалежних параметрах.

11. Запропоновано конструкцію універсального модуля для обробки полігональних поверхонь та способи його використання в різному технологічному обладнанні.

12. Розроблені загальні рекомендації по вдосконаленню способу та пристрою для обробки полігональних отворів.

13. Впровадження верстата дозволяє зменшити кількість використовуваного обладнання і трудомісткість обробки, штучний час обробки зменшився з 8.08 хв. до 4.2 хв, чисельність працюючих зменшиться з 6 до 1, кількість наладчиків - з 3 до 1 чоловіка. Собівартість деталі зменшилась з 83,10 грн. до 79,14 грн. Продуктивність праці зросла на 106%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кваліфікаційна робота: методичні вказівки до оформлення кваліфікаційних робіт для здобувачів першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівнів вищої освіти всіх освітніх програм денної та заочної форм навчання / уклад. Н.В. Ковальчук, Ю.Г. Фесіна, І.Л.Заблоцька Луцьк : ЛНТУ, 2023. 46 с.
2. Nataliya Zubovetska, Yurii Fedorus', Volodymyr Shvabyuk, Rostyslav Redko; To the problem of developing a methodology for the frequency analysis of spindle runout. AIP Conf. Proc. 1 November 2023; 2840 (1): 040007. <https://doi.org/10.1063/5.0169334>
3. Редько Р.Г. Дослідження та вдосконалення конструкції виконавчих вузлів багатошпindelного токарного напівавтомату для обробки шестерень / Р.Г.Редько, П.М. Цюпа, Р.П. Приступа // Студентський науковий вісник. Серія «Технічні науки». Науковий збірник. Випуск 47. – Луцьк: ІВВ ЛНТУ, 2022. - С. 266-272.
4. Редько Р.Г. Оптимізація параметрів шпindelного вузла / Редько Р.Г., Цюпа П.М. // Тези II студентської науково-технічної конференції факультету транспорту та механічної інженерії “ Інноваційні технології в транспорті та механічній інженерії ”. Луцьк: ЛНТУ – 2022 р. – С. 24-27.
5. Redko, R., Zabolotnyi, O., Redko, O., Savchuk, S., Kovalchuk, V.: Improvement of Manufacturing Technology and Recovery of Clamping Collets for Lathe Automats. In: Ivanov V. et al. (eds) Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham (2020).
6. Агрегатно-модульне технологічне обладнання: у 3-х част. Під ред. Ю.М. Кузнецова. Навч. посібник для ВНЗ. – Кіровоград, 2003 р.
7. Валявський І.А., Крижанівський В.А. Графічне моделювання робочого простору верстата-гексапода // Зб. наукових праць КДТУ / техніка в сільськогосподарському виробництві, галузеве машинобудування, автоматизація / Вип. 13. – Кіровоград, 2003. – с. 230-235.

8. Дмитрієв Д.О. Кінетостатичний аналіз каркасних компонок верстатів з механізмами паралельної структури // Науковий журнал "Технологічні комплекси" №2, 2010. – с. 40-45.
9. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою: Навчальний посібник для ВНЗ. /Під ред. Ю.М. Кузнецова. – Кіровоград, 2004. – 449 с.
10. Крижанівський В.А., Кузнецов Ю.М., Валявський І.А., Склярів Р.А. Технологічне обладнання з паралельною кінематикою.- Кіровоград, 2004. - 449с.
11. Кузнецов Ю.М. Світові тенденції і перспективи розвитку верстатобудування в Україні // Збірник наукових праць за матеріалами науково-методичної конференції "Проблеми фізико-математичної і технічної освіти і науки України в контексті євроінтеграції (Вища освіта-2006)".- К.: НПУ ім. М.П. Драгоманова, 2007. – с.45 -55.
12. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О. Візуалізація формоутворюючих рухів механізмами паралельної структури в верстатах нових компонок // Вісник ТДТУ імені Івана Пулюя, 2008, № 1, – с. 61-70.
13. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О. Моделювання технологічних рухів в верстатах з паралельною кінематикою при обробці складно-профільних поверхонь // Зб. наукових праць НТУ "ХП" "Сучасні технології в машинобудуванні", вип. 1, 2008. – с. 81-89.
14. Кузнецов Ю.М., Дмитрієв Д.О. Програмно-математичний апарат керування виконавчим органом багатокординатних верстатів нових компонок // Автоматика, автоматизація, електричні комплекси і системи. – Херсон. Вид. ХНТУ, №1(21), 2008. – с.162-169.
15. Кузнецов Ю.М., Самойленко О.В. Математичне моделювання процесу обробки полігональних поверхонь на токарному верстаті методом кінематичного налагодження // Наукові нотатки. Міжвуз. збірник за напрямом "Інженерна механіка", Луцьк, 2007, №20. – С. 232...238.

16. Кузнєцов Ю.М., Самойленко О.В. Обробка полігональних поверхонь: теорія і практика. Монографія. – К.: ТОВ "ГНОЗІС", 2008. – 193 с.
17. Кузнєцов Ю.М., Самойленко О.В. Полігональні поверхні в машинобудуванні та нові способи їх обробки // Вісник Національного технічного університету України "КПІ". Машинобудування. – 2001. – № 41. – С. 38...46.
18. Кузнєцов Ю.М., Самойленко О.В., Валід Алі Рамадан. Модернізація багатошпиндельного токарного автомату мод. 1Б240-6 для виготовлення деталі з шестигранним отвором // Технологічні системи. Наукові розробки і результати досліджень. – 2002. – №2 (13). – С. 81...84.
19. Самойленко О.В. Вдосконалення токарних верстатів для обробки полігональних поверхонь методом кінематичного налагодження / Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. – К., 2006. – 195 с.
20. Самойленко О.В. Дослідження пристроїв для обробки полігональних глухих отворів невеликих розмірів // Промислова гідравліка і пневматика. Всеукраїнський науково-технічний журнал. – Вінниця: ВДАУ, 2007. – Вип. 1(15). – С. 105...109.
21. Bing Li . Xiaoping Hu . Hao Wang Analysis and simulation for a parallel drill point grinder. Part 2: grinding kinematic modeling and simulation // Int J Advanced Manufacturing Technology (2006) 30: P. 221–226.
22. Huang Q., Hadeby H., Sohlenius G. Connection Method for Dynamic Modelling and Simulation of Parallel Kinematic Mechanism (PKM) Machines //Int I Adv Manuf Technol (2002) 19:163 – 173, 2002. Springer – Verlag, London, Limited.