

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-
МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН**

До захисту допущено:
Завідувач кафедри
_____ Олександр САЛЕНКО
« ____ » _____ 2026 р.

**Дипломний проєкт
на здобуття ступеня бакалавра
за освітньою програмою «Конструювання та дизайн машин»
спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: «Швидкопереналагоджувальний затискний патрон токарного
верстата»**

Виконав:

студент IV курсу, групи МК-21

Мироненко Станіслав Олександрович

Керівник:

професор, д.т.н., професор,

Кузнєцов Юрій Миколайович

Рецензент:

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП МК-21.00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	80	
3	A1	ДП МК-21.01.000 ТК	Патентно-інформаційні дослідження по темі згідно ДСТУ 3575-97	1	
4	A1	ДП МК-21.02.000 ТК	Приклади ШПЗП	1	
5	A1	ДП МК-21.03.000 ТК	Морфологічна модель ШПЗП	1	
6	A1	ДП МК-21.04.000 ТК	Варіанти ШПЗП з морфологічними формулами	1	
7	A1	ДП МК-21.05.000 ТК	Розрахункова схема силових характеристик ШПЗП	1	
8	A1	ДП МК-21.06.000 ТК	Результати розрахунку силових характеристик ШПЗП	1	
9	A1	ДП МК-21.07.000 ТК	3D-вигляд ШПЗП	1	
10	A1	ДП МК-21.08.000 ТК	Динамічна модель ШПЗП	1	
11	A1	ДП МК-21.09.000 ТК	Математична модель ШПЗП	1	

				ДП МК-21 00.000.00		
	ПІБ	Підп.	Дата	Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Розробн.	Мироненко				1	1
Керівн.	Кузнєцов				КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. КМ Гр. МК-21	
Консульт.						
Н/контр.						
Зав.каф.	Саленко					

**Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Швидкопереналагоджувальний затискний патрон токарного
верстата з ЧПК»**

Київ – 2026 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-
МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ МАШИН**

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)
Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»
Освітня програма «Конструювання та дизайн машин»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Олександр САЛЕНКО

«___» _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Мироненко Станіслав Олександрович

1. Тема проєкту «Швидкопереналагоджувальний затискний патрон токарного верстата з ЧПК», керівник проєкту Кузнецов Юрій Миколайович, професор, д.т.н., професор, затверджені наказом по університету від «___» _____ 2026 р. № _____
2. Термін подання студентом проєкту 10.06.2026
3. Вихідні дані до проєкту: ШПЗП токарного верстата з ЧПК; вимоги до точності, жорсткості, надійності та швидкості переналагодження.
4. Зміст пояснювальної записки: вступ; принципи створення ЗП; патентно-інформаційні дослідження; морфологічний аналіз; конструкторський і розрахунковий розділи; висновки. Пристрій для фрезерної обробки деталі типу «вал».
5. Перелік графічного матеріалу: патентні дослідження; приклади ШПЗП; морфологічна модель; варіанти ШПЗП; розрахункові схеми; 3D-вигляд; динамічна й математична модель.
6. Дата видачі завдання 20.09.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Опрацювання літературних джерел щодо затискних патронів і формування вимог до ШПЗП	20.09.2025 – 31.12.2025	Виконано
2	Проведення патентно-інформаційних досліджень за темою затискних патронів	05.01.2026 – 31.01.2026	Виконано
3	Морфологічний аналіз, побудова морфологічної моделі та синтез схем ШПЗП	01.02.2026 – 28.02.2026	Виконано
4	Розроблення варіанта конструктивного виконання ШПЗП та опис принципу роботи	01.03.2026 – 31.03.2026	Виконано
5	Розрахунок силових характеристик ШПЗП, аналіз результатів і формування висновків	01.04.2026 – 25.05.2026	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки, графічної частини та подання проєкту на захист	26.05.2026 – 10.06.2026	Виконано

Студент

Станіслав МИРОНЕНКО

Керівник

Юрій КУЗНЄЦОВ

Завдання друкується на одному аркуші з двох сторін

РЕФЕРАТ

У дипломному проєкті розглянуто актуальну для сучасного машинобудування тему – розробка та дослідження швидкопереналагоджуваного затискного патрона для токарного верстата з числовим програмним керуванням (ЧПК). У роботі проаналізовано сучасний стан і напрями застосування силових та швидкозмінних патронів, сформульовано вимоги до конструкцій, що працюють у режимах частих переналагоджень, підвищених обертів та жорстких вимог до точності й безпеки.

Виконано розрахунок і конструювання швидкопереналагоджуваного патрона діаметром 250 мм з пневматичним приводом затиску: обґрунтовано вибір приєднувального інтерфейсу, кінематичної схеми й параметрів клинового механізму, розраховано затискні сили, моменти, елементи привода, а також проведено перевірку основних деталей на міцність і жорсткість. Запропоновано комплекс заходів з підвищення експлуатаційних характеристик патрона: скорочення часу переналагодження за принципами SMED, оптимізація профілю кулачків і контактної плями, балансування для роботи на високих обертах, вибір мастильних матеріалів та схеми герметизації, впровадження моніторингу стану (датчики тиску/ходу) та планово-попереджувального обслуговування. Виконано порівняння запропонованої конструкції з прототипом та оцінено техніко-економічну ефективність її впровадження у виробництво.

Дипломний проєкт містить 3 розділи, 80 сторінок, 11 рисунків, 12 найменувань у переліку використаних джерел.

Ключові слова: токарний верстат з ЧПК; швидкопереналагоджуваний затискний патрон; силовий патрон; клиновий механізм; затискна сила; час переналагодження; балансування; моніторинг стану.

ABSTRACT

In the course of the thesis, the author considered a topical issue for modern mechanical engineering – the development and investigation of a quick-change power chuck for a CNC lathe. The thesis analyses the current state and fields of application of power and quick-change chucks, and formulates the main requirements for workholding devices operating under conditions of frequent changeovers, increased spindle speeds, and high demands on accuracy and safety.

A quick-change chuck with a diameter of 250 mm and a hydraulic clamping drive has been designed and calculated. The choice of spindle mounting interface, kinematic scheme and wedge mechanism parameters has been substantiated; clamping forces, transmitted torques and drive parameters have been determined, and the main components have been checked for strength and stiffness. A set of measures to improve the operational characteristics of the chuck has been proposed: reduction of set-up time based on SMED principles, optimisation of jaw profile and contact area, balancing for high-speed operation, selection of lubricants and sealing scheme, and implementation of condition monitoring (pressure/stroke sensors) and preventive maintenance. A comparative assessment of the proposed chuck and the prototype has been carried out, and the techno-economic efficiency of its implementation in production has been evaluated.

This thesis consists of three chapters, 80 pages, 11 figures, and 12 references.

Keywords: CNC lathe; quick-change power chuck; workholding device; wedge mechanism; clamping force; set-up time; balancing; condition monitoring.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ СТОСОВНО ШВИДКОПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНИХ ЗАТИСКНИХ ПАТРОНІВ ДЛЯ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК.....	12
1.1 Будова, класифікація та основні вузли патрона.....	12
1.2 Принцип дії та кінематика затискання/розтискання.....	18
1.3 Вимоги інтеграції з ЧПК, точності й безпеки.....	21
2. РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ШВИДКОПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНОВОГО ПАТРОНА.....	27
2.1 Вибір головних розмірів і приєднувальних стандартів (DIN/ISO, тип фланця).....	27
2.2 Кінематична схема та баланс сил у приводі.....	30
2.3 Розрахунок затискних сил, моментів і коефіцієнтів тертя.....	32
2.4 Вибір і розрахунок привода (пневмо-, пневмо-, електромеханічний)....	34
2.5 Розрахунок на міцність і жорсткість (корпус, кулачки, тягові елементи).....	38
2.6 Точність, співвісність і радіальне/торцеве биття.....	40
2.7 Конструкція модуля швидкої зміни кулачків/вкладишів.....	45
2.8 Матеріали, термообробка та зносостійкі покриття.....	52
2.9 Технологічність виготовлення та збирання; контроль якості.....	56
2.10 Аналіз ризиків і безпеки; міжблокування та типові випробування.....	60
3. СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШВИДКОПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНОВОГО ПАТРОНА.....	65
3.1 Зменшення часу переналагодження (SMED) та ергономіка змінного оснащення.....	65
3.2 Оптимізація профілю кулачків і контактної плями; компенсація деформацій.....	67

3.3	Балансування, приглушення вібрацій і робота на високих обертах....	68
3.4	Вплив мастильних матеріалів та герметизації на ресурс і точність...	73
3.5	Моніторинг стану (датчики тиску/ходу), діагностика та ППР.....	75
3.6	Порівняння з прототипом і верифікація на стендових та виробничих випробуваннях.....	76
3.7	Економічна ефективність: собівартість, окупність, ефект від упровадження.....	77
4.	Технологічне оснащення на виготовлення патронів(лещата).	79
5.	Кресленик технологічного оснащення.....	80
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	92
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	95

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ Й УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ЧПК – числове програмне керування
- ШЗП – швидкопереналагоджуваний затискний патрон
- КП – кулачковий патрон
- ЦП – цанговий патрон
- ПП – пневмопатрон (пневматичний привід)
- ПП – пневмопатрон (пневматичний привід)
- ШЗК – швидкозмінні кулачки
- ФП – фланцеве приєднання (тип приєднання патрона до шпинделя)
- TIR – повне індикаторне биття (total indicated runout)

ВСТУП

Токарні верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК) стали базовою ланкою сучасного машинобудування завдяки високій продуктивності, стабільній якості та можливості автоматизованого виготовлення деталей зі складною геометрією. Ключовим елементом, який безпосередньо впливає на точність, безпеку та швидкодію обробки, є система закріплення заготовки. Традиційні патрони з тривалим переналагодженням обмежують ефективність гнучких виробництв, де номенклатура часто змінюється, а розміри партій зменшуються. За таких умов критичними стають зменшення часу підготовчо-завершальних операцій (SMED), забезпечення повторюваності биття, компенсація впливу відцентрових сил на затиск при високих обертах, а також інтеграція засобів контролю стану.

Швидкопереналагоджуваний затискний патрон (ШЗП) призначений для мінімізації часу зміни оснастки та адаптації під різні типорозміри заготовок без втрати точності й жорсткості. Інженерний виклик полягає у поєднанні протилежних вимог: високих затискних сил і малої деформації тонкостінних деталей; простоти та швидкості заміни кулачків із надійним самогальмуванням; компактності конструкції з можливістю інтеграції у шпиндельні інтерфейси стандартів DIN/ISO та систем автоматичної подачі/видалення заготовок. Додатково актуальними є питання безпеки (міжблокування, контроль тиску/ходу), зносостійкості вузлів тертя та технологічності виготовлення.

Метою роботи є розроблення та інженерне обґрунтування конструкції швидкопереналагоджуваного затискного патрона токарного верстата з ЧПК, яка забезпечує скорочення часу переналагодження при збереженні (або підвищенні) точності, жорсткості та безпеки роботи на номінальних і підвищених обертах.

Об'єктом дослідження є система затискання заготовки токарного верстата з ЧПК.

Предметом дослідження є конструкція, силові та точнісні характеристики

швидкопереналагоджуваного затискного патрона, а також його експлуатаційні показники в умовах змінюваної номенклатури.

Виходячи з поставленої мети, у роботі вирішуються такі завдання:

- сформулювати вимоги до ШЗП з урахуванням умов експлуатації, стандартів приєднання та безпеки;
- обґрунтувати принципову кінематичну схему й вибрати тип привода (пневмо/пневмо/електромеханічний) для механізму затискання/розтискання;
- виконати розрахунок затискних сил і моментів з урахуванням коефіцієнтів тертя та відцентрових навантажень на високих обертах;
- провести перевірочні розрахунки на міцність і жорсткість основних елементів (корпус, кулачки, тягові елементи), оцінити деформації та вплив на радіальне/торцеве биття;
- спроектувати модуль швидкої заміни кулачків/вкладишів та проаналізувати його надійність і ергономіку;
- визначити допуски та заходи забезпечення точності (TIR), включно з балансуванням і вібростійкістю;
- розробити технологію виготовлення та збирання, схеми контролю якості й безпеки;
- виконати порівняльну оцінку з прототипом/базовою конструкцією за показниками часу переналагодження, точності, ресурсу та умов обслуговування;
- надати рекомендації щодо впровадження, технічного обслуговування та подальшої модернізації (у т. ч. сенсорний моніторинг стану).

1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ СТОСОВНО ШВИДКОПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНИХ ЗАТИСКНИХ ПАТРОНІВ ДЛЯ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

1.1 Будова, класифікація та основні вузли патрона

Затискний патрон токарного верстата – це складний механічний пристрій, призначений для надійного, повторюваного та точного центрування й закріплення заготовки на шпинделі верстата. У контексті токарних верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК) вимоги до патрона суворі: він має забезпечувати мінімальне індикаторне биття (TIR), високу жорсткість при передачі крутного моменту, стабільність затискної сили при зміні режимів різання та швидко операцію переналагодження (quick-change) з демонстративно низьким впливом на параметри обробки. Конструктивне рішення патрона визначається сукупністю вимог технології обробки, типорозміру заготовок, режимів шпинделя і організації виробництва (серійність, гнучкість).

У своїй архітектоніці швидкопереналагоджувані патрони поєднують кілька функціональних підсистем: жорстку несучу частину (корпус), привід затискного механізму (пнеumo/пнеumo або електромеханічний узел), перетворювач руху (клинова або гвинтово-рейкова передача), синхронізуючі елементи (затискні кулачки – master jaws і top/soft jaws), модуль заміни інструменту (швидкозмінний вузол кулачків), ущільнення та мастильну підсистему, а також допоміжні елементи для монтажу й сервісу (фланець приєднання, кришка, штуцера мастила тощо). Основні геометричні та матеріальні параметри – товщина стінки корпусу, форма напрямних для кулачків, кут скосу клина, товщина кулачків і їхні матеріали – визначаються розрахунками на міцність, контактне напруження й довговічність при циклічних навантаженнях.

Принцип дії більшості силових (power) патронів базується на перетворенні осьового зусилля в радіальне. У пневматичних і пневматичних варіантах осьовий зусилля створює кільцевий поршень: рух поршня передається на клинові

елементи (wedge plunger), які через ковзний контакт змушують майстер-кулачки синхронно переміститися в напрямних корпусу. Клинова кінематика має ряд переваг: високе передавальне відношення (малий осьовий хід – велике радіальне переміщення), відсутність люфтів у відповідних інтерфейсах при правильному підборі шорсткості та допусків, а також відносно просту герметизацію вузла. Електромеханічні приводи, в яких осьовий рух генерує гвинтовий механізм або серводвигун з кульовим гвинтом, дають більшу керованість, але ускладнюють конструкцію й збільшують габарити та вартість.

Класифікаційно патрони поділяються за кількома ознаками: за кількістю кулачків (3-кулачкові самоцентрувальні, 4-кулачкові незалежні, спеціалізовані 2- чи 6-кулачкові), за типом привода (пневматичні, пневматичні, електромеханічні, ручні), за кінематикою перетворення руху (клинові, гвинтові/шпіндельні, цангові, мембранні), за функціональністю (звичайні, силові, швидкозмінні модульні), за типом приєднання до шпинделя (конусні, байонетні, фланцеві згідно ISO/ DIN) і за наявністю додаткових функцій (сенсорний моніторинг, ущільнення для СОЖ, системи самоблокування). Кожна категорія має свої сфери застосування: наприклад, силові пневмопатрони використовують при обробці важких заготовок і у режимах підвищених крутних моментів, модульні швидкозмінні патрони – у потокових та гнучких виробництвах з частою зміною номенклатури.

На експлуатаційні характеристики патрона істотно впливають конструкційні деталі. Корпус повинен мати достатню масу та симетрію для зменшення ризику небалансу при високих обертах і містити напрямні із жорсткою геометрією, що забезпечують синхронність руху кулачків. Направні виконуються у формі ластівчиного хвоста або призматичних пазів; форма й допуски визначають природу тертя (ковзання проти кочення), що впливає на знос і ефективність передавання зусилля. Майстер-кулачки виготовляють із загартованих сталей із відповідним термообробленням, верхні (soft) кулачки можуть бути знімними та виготовлятися із матеріалів із низьким коефіцієнтом тертя або мати полімерні вставки для тонких/чутливих заготовок.

У конструкції швидкозмінного вузла кулачків основним завданням є забезпечення одночасної сумісності: швидка заміна, точне повторне центрування та надійна фіксація. Для цього застосовують стандартизовані роз'єми та пази (Т-гайки, зубчасті і шпонкові інтерфейси), механізми самофіксації (паз-замок, фіксатори з кульками), а також покажчики позиції для оперативного контролю правильності встановлення. Важливим елементом є ланцюг контролю: гвинтові або кулькові фіксатори, які не дають змоги виконати працюючий цикл верстата при незміненому або неправильно встановленому кулачку; це підвищує рівень безпеки при автоматизованому переналагодженні.

Матеріально-технологічні рішення також значущі: корпуси та кулачки зазвичай виготовляють із легованих або карбоністих сталей з наступною цементацією й загартуванням зон контактів; напрямні та клинові поверхні піддають шліфуванню та нітридуванню для зменшення зносу. У вузлах ковзання передбачають масляні канали та штуцери для централізованого змащення; робочі поверхні захищаються від СОЖ за допомогою лабіринтових ущільнень і О-рингових вставок. Для верстатів, що працюють на підвищених обертах, практикують динамічне балансування в зборі з урахуванням маси змінних кулачків та втулок.

Критеріями вибору конкретної конструкції патрона стають: допустима величина індикаторного биття після встановлення заготовки (TIR), максимальний допустимий діаметр та довжина оброблюваної деталі (із урахуванням наскрізного отвору в патроні), величина й діапазон регульованої затискної сили (F_z), стійкість до осьових/радіальних імпульсних навантажень, час переналагодження (відмірюється в хвилинах або секундах), простота технічного обслуговування, сумісність з існуючими шпиндельними інтерфейсами і вартість володіння (включно з експлуатаційними витратами на мастило, ремонт і запасні частини).

У сучасних рішеннях все ширше застосовують інтелектуальні елементи: датчики тиску у пневмосистемі або датчики переміщення виконавчого плунжера, що дозволяють реалізувати онлайн-моніторинг стану затискного вузла,

діагностику передбачуваних відмов і автоматичний контроль фази затиск-відпуск; така інтелектуалізація важлива при впровадженні безлюдних змін і систем Industry 4.0. Доцільно інтегрувати також логіку міжблокування з ЧПУ – щоб у разі виявлення аномалії (недостатня затискна сила, розгерметизація) верстат блокував робочий цикл і сигналізував оператору.

Нарешті, випробування та сертифікація конструкцій патронів здійснюються шляхом комплексних стендових тестів: визначення TIR після циклів заміни кулачків, вимірювання затискної сили у різних точках кулачка, тест на знос після певної кількості циклів, динамічне балансування при номінальних обертах, а також перевірка витривалості ущільнень до впливу СОЖ. Стандарти ISO (наприклад, ISO 3442 для самозатискних патронів і ISO 702 для приєднань шпинделя) визначають необхідні контрольні розміри і режими перевірки, що забезпечує взаємозамінність і допустимість застосування обраної конструкції у виробничому середовищі.

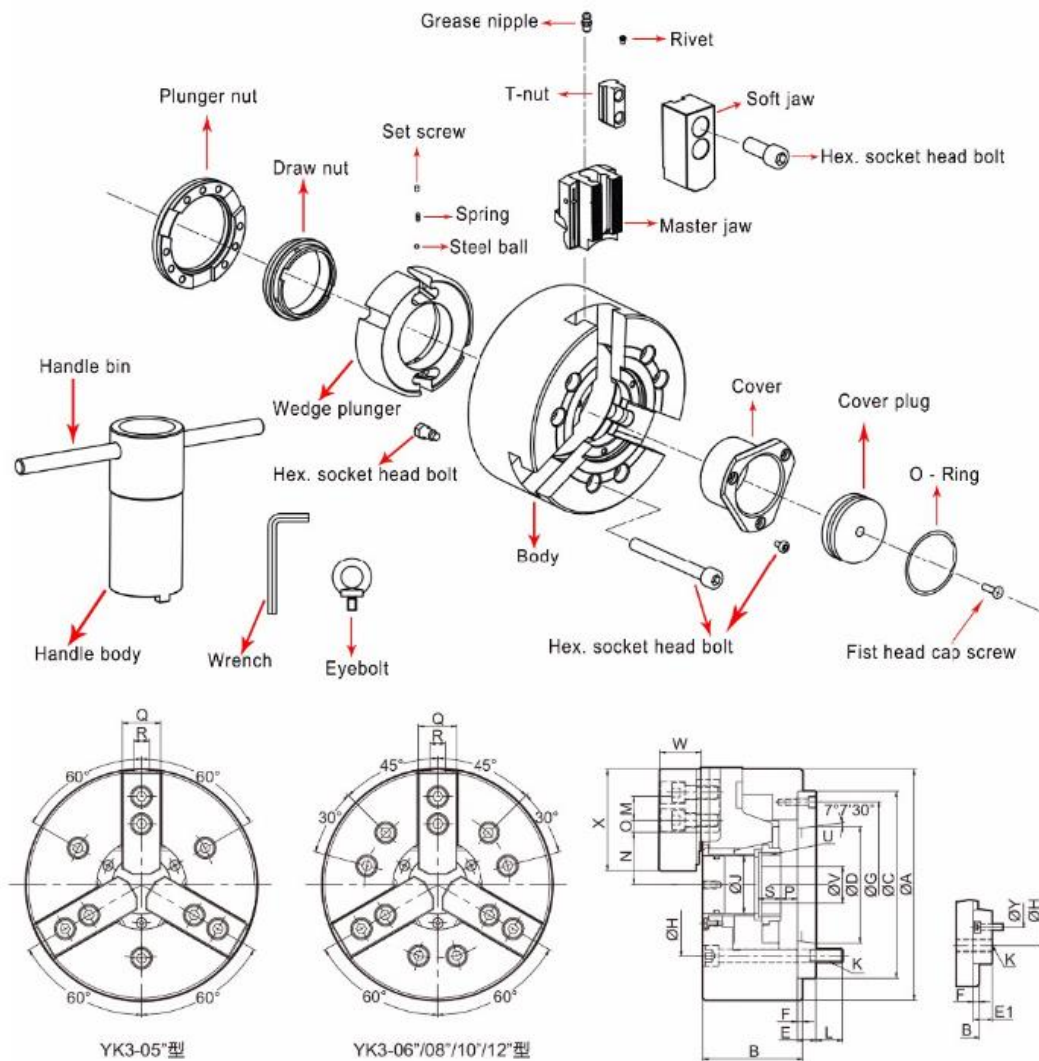


Рисунок 1.1 – Вибухова схема швидкопереналагоджуваного трьохкулачкового патрона

Ілюстрація (рис. 1.1) наочно демонструє принципову архітектуру швидкопереналагоджуваного трьохкулачкового патрона, що широко застосовується в сучасних токарних верстатах з ЧПК. На схемі виокремлено функціональні блоки, які утворюють єдину робочу систему: несучий корпус, перетворювач осьового ходу в радіальний (клиновий плунжер і draw-nut), синхронізуючі елементи (master-кулачки), змінні робочі вставки (soft/top-кулачки), елементи фіксації та обслуговування (T-nut, grease nipple, cover, set screw) і монтажні/інструментальні аксесуари (wrench, eyebolt, handle). Візуалізація дозволяє прослідкувати як статичну, так і кінематичну взаємодію вузлів: при осьовому русі кільцевого поршня (draw-nut) клиновий елемент (wedge plunger) ковзає по спрямовуючим і через свій профіль перетворює

невеликий осьовий хід на значний радіальний зсув кулачків, що забезпечує потрібну затискну силу на заготовці.

Конструктивні рішення, що видно на схемі, обґрунтовуються технічними вимогами до точності, жорсткості та довговічності: напрямні виконані з профілем «ластівчин хвіст» або призматичного паза, що забезпечує високу бічну жорсткість і мінімізує люфт; master-кулачки виготовляються із загартованої інструментальної сталі, при цьому контактні поверхні піддаються шліфуванню і часто додатковому хімічному чи термічному зміцненню (нітрування, хромування) для підвищення зносостійкості. Змінні soft-кулачки мають простий механічний інтерфейс (Т-паз, шпонка або зубчатий профіль) для швидкої й повторюваної заміни; їхня геометрія і матеріал підбираються з урахуванням конкретної технології обробки (м'які вставки для тонкостінних деталей, твердосплавні або сталеві – для шорстких заготовок).

Особливу увагу в конструкції приділено питанням мастила і захисту від агресивного середовища. Наявність мастильних штуцерів (grease nipple) та внутрішніх каналів дає змогу проводити централізовану подачу мастила до контактних пар; ущільнення (O-ring) і захисні кришки (cover, cover plug) зменшують проникнення стружки і СОЖ у критичні зони, що суттєво підвищує ресурс вузлів і стабільність характеристик у тривалій експлуатації.

Схема ідентифікує також елементи сервісного обслуговування та безпеки. Наявність стопорних гвинтів (set screw), штифтів/rivets і фіксаторів перешкоджає самовільному розпуску кулачків під динамічними навантаженнями; монтажні отвори та підйомні вушка (eyebolt) спрощують операції демонтажу і монтажу патрона на шпindel. У контексті систем ЧПК доцільно проектувати додаткові механічні або електронні засоби контролю правильності встановлення кулачків (положення T-nut, фіксація cover), а також інтегрувати датчики положення або тиску, що дозволяють реалізувати контроль затискної сили в реальному часі і забезпечити блокування циклу у разі аномалій.

З точки зору технологічності виготовлення, вибухова схема підкреслює модульний характер конструкції: багато деталей – стандартизовані елементи

(гвинти з внутрішнім шестигранником, Т-гайки, ущільнення) – що спрощує виготовлення, запасні частини та ремонт. При цьому важливим аспектом є дотримання вимог допусків і шорсткостей на площинах спряження, адже навіть незначні відхилення впливають на кінематичну синхронність кулачків і величину TIR.

Експлуатаційна оцінка і випробування патрона зазвичай включають: визначення індикаторного биття (TIR) після циклу заміни кулачків, довговічні стендові випробування (циклічні тести на затиск/відпуск), вимірювання затискної сили по всьому діапазону ходу, тестування герметичності в середовищі СОЖ та динамічні випробування при номінальних і підвищених обертах шпинделя. Для застосувань у серійному виробництві критеріями прийнятності є час переналагодження (як правило – хвилини), відтворюваність позиціонування і ресурс без капітального втручання.

1.2 Принцип дії та кінематика затискання/розтискання

Робочий цикл швидкопереналагоджуваного трьохкулачкового патрона ґрунтується на перетворенні осьового зусилля виконавчого привода у радіальний тиск кулачків на заготовку через клинову кінематику. У силових патронах осьове зусилля створює пневмо- або пневмоциліндр, що діє на тяглову гайку/поршень; останній переміщує клиновий плунжер, профіль якого з'єднано з повзунками майстер-кулачків. Коли поршень рухається вздовж осі шпинделя, клинові поверхні перепрофілюють невеликий осьовий хід у синхронний радіальний зсув трьох кулачків назустріч центру, забезпечуючи самоцентрування заготовки та рівномірний розподіл сил контакту. Коли тиск знімається або діє зворотний тиск/пружини, ланцюг працює навпаки – кулачки розтискаються і відводяться радіально назовні, відкриваючи робочу зону. Важливим є те, що під час усього циклу напрямні «кулачок–корпус» працюють у режимі ковзання з контрольованим тертям і мастилом, тому точність та відтворюваність положення визначаються якістю шліфування напрямних і геометрією клина [6–9].

У першому наближенні перетворення сил в ідеальній клиновій парі описують простою залежністю між осьовою силою F_a і радіальною силою затискання на один кулачок F_r :

$$F_r \approx \frac{F_a}{2 \tan \alpha}, \quad (1.1)$$

де α – кут нахилу клина. Реальна пара має тертя з коефіцієнтом f , тому ефективна сила зменшується; з урахуванням тертя зручно користуватись формулою

$$F_r \approx \frac{F_a \cos(\alpha - \arctan f)}{\sin(\alpha + \arctan f)}, \quad (1.2)$$

яка добре описує зниження ККД при зростанні f дозволяє коректно підбирати кут клина для заданих тисків привода та бажаної сили затиску [7]. Одночасно з силовим перетворенням визначальним є кінематичний «виграш» по ходу: менший осьовий хід поршня дає більший радіальний відсік кулачків, що безпосередньо впливає на швидкість циклу «затиск–розтиск» і, відповідно, на час переналагодження (SMED). Саме завдяки цій властивості клинова кінематика стала домінуючою у швидкозмінних патронах і продуктах провідних виробників [6–9].

Під час обертання шпинделя відцентрові сили, пропорційні ω^2 , прагнуть зменшити ефективну силу притиску верхніх кулачків до заготовки. У розрахункових оцінках це зручно врахувати як «втрати» F_c на кожен кулачок: $F_c \approx m_{\text{екв}} r \omega^2$, де $m_{\text{екв}}$ – еквівалентна маса рухомих частин у радіальному плечі r . Тоді умовна робоча сила на контакті дорівнює $F_{\text{еф}} = F_r - F_c$. Саме тому у високошвидкісних виконаннях застосовують легші топ-кулачки, балансування з урахуванням конкретних насадок і обмежують максимальні оберти для заданих масових конфігурацій; деякі каталожні лінійки подають номограми допустимих ω від маси кулачків та вильоту [6–9]. Разом з тим, стабільність $F_{\text{еф}}$ у динаміці підтримується герметизацією та регулярним змащенням клинових поверхонь, що зменшує «просідання» сили через збільшення тертя й нагрів.

Ключовою вимогою ЧПК-токарної обробки є повторюваність геометричного положення заготовки при багатократних циклах затискання. Самоцентрувальний механізм забезпечує мінімальне повне індикаторне биття

(TIR) завдяки жорстким напрямним і регламентованим посадкам «master-jaw–корпус». У швидкопереналагоджуваних системах верхній (soft) кулачок знімається з бази через стандартизований інтерфейс (Т-паз або пряме зубцювання) без порушення базування «master-jaw», що дозволяє міняти захват під інший діаметр за хвилини і зберігати TIR у межах каталогових норм після кожної заміни [1–3]. Ефект швидкої перенастройки особливо помітний у гнучких виробництвах з частою зміною номенклатури, де час ПЗО безпосередньо трансформується у випуск, що підтверджують як прикладні дослідження, так і виробничі кейси.

Геометрична точність і довговічність кінематичного ланцюга у великій мірі забезпечуються триединою умовою: правильним добором кута клина α під тиск привода, контрольованими допусками та шорсткостями на напрямних, а також правильно організованою мастильно-ущільнювальною системою. Типові значення α 30–35° забезпечують компроміс між «силою–ходом»; менші кути підвищують силовий множник, але чутливіші до тертя (ризик «заклинювання» при недостатньому змащенні), більші – прискорюють хід, але вимагають більшого тиску привода для досягнення тієї самої сили F_r . Для підвищення відтворюваності сили у сучасних конструкціях застосовують ущільнені (sealed) виконання, що знижують вплив СОЖ і стружки, і, за можливості, сенсори тиску/положення для діагностики неповного затиску та інтеграції з міжблокуваннями ЧПК [2].

Кінцева якість функціонування визначається не лише силовою схемою, а й інтерфейсами інтеграції зі шпинделем: приєднувальні розміри та точність посадок регламентують стандарти ISO 702-1/-3 для носів шпинделів і ISO 3442-3 для геометричних тестів та щільників двоскладових кулачків, що гарантує взаємозамінність та відтворювані показники TIR і жорсткості після монтажу на різні верстати [10–12]. Дотримання цих стандартів спільно з правильною балансуванням комплекту «патрон + кулачки + вкладиші» дозволяє працювати на підвищених обертах без критичного падіння F_{ef} і без зростання вібрацій, що особливо важливо для тонкостінних або довгомірних заготовок.

У сумі кінематика затискання/розтискання швидкопереналагоджуваного патрона є узгодженим поєднанням короткохідної осьової дії привода, ефективного клинового перетворення, жорстких і малотертяних напрямних, модульного швидкозмінного інтерфейсу кулачків і стандартизованого приєднання до шпинделя. Саме така синергія забезпечує високу швидкодію циклів, стабільну силу затискання у широкому діапазоні обертів і повторюваність геометричного базування, що і робить ці патрони базовим вибором для ЧПК-токарних операцій у серійному та гнучкому виробництві.

1.3 Вимоги інтеграції з ЧПК, точності й безпеки

Інтеграція швидкопереналагоджуваного затискного патрона в систему токарного верстата з ЧПК повинна розглядатися не як просте механічне приєднання, а як комплекс інженерних рішень, що включає механічну, пневмопневматичну/електромеханічну, електрично-електронну і програмну узгодженість з контролером верстата, заходи забезпечення повторюваності позиціонування, динамічної стабільності при робочих режимах і комплекс процедур з охорони праці та експлуатаційної безпеки. Нижче викладено розгорнуті техніко-експлуатаційні вимоги, обґрунтування і рекомендації для практичної реалізації.

Механічні та геометричні вимоги. Патрон має забезпечувати сумісність приєднувального інтерфейсу зі шпинделем верстата згідно з нормативами (ISO 702-1/-3 або відповідна DIN/ANSI) – точність посадки і відсутність люфтів у фланцевому/конічному з'єднанні є пріоритетними для мінімізації похибок центрування. Загальне індикаторне биття (TIR) на зовнішній поверхні заготовки після фіксації має відповідати технологічним вимогам операції; орієнтовно для універсального токарного застосування приймають $TIR \leq 0,02 \dots 0,05$ мм, для високоточних операцій – $\leq 0,01 \text{--} 0,02$ мм. Повторюваність встановлення (repeatability) після багаторазових циклів заміни кулачків має бути в межах $\pm 0,01$

мм або краще, що досягається жорсткими напрямними master-кулачків, контрольованими допусками і застосуванням посадкових кромок/референсних фасок для автоматичної центровки replacement-елементів.

Силіві і динамічні вимоги. Патрон повинен гарантувати необхідну величину затискної сили F_z із запасом по міцності з урахуванням динамічних навантажень, які виникають під час різання і при вібраціях. Для силових виконань типові робочі зусилля можуть бути в межах 5–50 кН загалом (залежно від розміру патрона), при цьому необхідно передбачити методику вимірювання і калібрування затискної сили (індикатори при налаштуванні або вбудовані датчики тиску). Важливо враховувати вплив центробіжних сил при високих обертах: маса змінних кулачків і вкладок має бути мінімізована; необхідне динамічне балансування «патрон+кулачки+вкладиші» до рівня, що відповідає робочим обертам (показник G-балансу згідно з ISO/NAS), з урахуванням максимально допустимого рівня вібрацій для конкретної операції.

Пневмопневматичні й приводні вимоги. Якщо привід затискання пневматичний або пневматичний, система має забезпечувати стабільний робочий тиск у заданому діапазоні, мати фільтрацію й осушування (для пневмо) і захист від гідравлічних ударів. Рекомендуються: для пневматики – ступінь підготовки повітря не нижче ISO 8573-1 (відповідні класи), для пневмо – фільтрація не гірше класу $\beta_x=10$. Робочий тиск та витрата повинні бути протестовані так, щоб при номінальному тиску отримувати заплановану F_a і, відповідно, F_r з урахуванням втрат на тертя. Для електромеханічних приводів – застосування серводвигуна з позиційним контролером або кулькового гвинта з енкодером дає кращу керованість ходу і силу, але потребує додаткової електроніки й захисту від перевантажень.

Електронна інтеграція і обмін сигналами. Для повноцінної інтеграції в ЧПК важливі дискретні та аналогові сигнали, які мають бути підключені до полів вводу/виводу ПЛК або до входних модулів ЧПУ. Мінімальний набір сигналів: команда «затиснути / відпустити» (дискретний), сигнал підтвердження «затиснуто / відпустжено» (дискретний), сигнал «недостатня затискна сила» або

«перевищена/знижена тиск/повітря» (дискретний/аналоговий), датчик положення плунжера (аналоговий або інкрементний/абсолютний енкодер), сигнал «фіксація кулачка належно виконана» (дискретний). Ключовою вимогою є організація захищеної лінії повідомлень для стану патрона, яка виключає можливість продовження ЧПУ-програми при непередбачуваному стані патрона (інтеграція з логікою М-кодів і міжблоковими умовами). Рекомендується реалізувати затверджені функціональні блоки в ПЛК/ЧПУ: (а) блок запуску циклу затиску з таймаутом; (б) перевірка стану датчиків після завершення циклу; (в) аварійне блокування у випадку невідповідності; (г) реєстрація подій для діагностики.

Програмна і операційна взаємодія. Для безпечної роботи в автоматизованих циклах бажано використовувати стандартизовані М/Р-коди ЧПУ для виклику операцій затиск/відпуск (наприклад, Мхх – команда затиснути; Муу – команда відпустити), а також передбачити макрокоманди на контролері для перевірок (чек-листи перед стартом: правильний тип кулачків, наявність вкладишів, маса насадок). Цикли мають супроводжуватися тимчасовими інтервалами (таймаути) і кількісними перевітками (максимальна кількість повторних спроб перед аварією). Важливо документувати в системі ЧПУ типи патронів/комплектів кулачків, їх параметри балансу, граничні оберти і допустимі вильоти, щоб оператор міг обирати допустимі режими обробки.

Контроль, діагностика і моніторинг стану. Обов'язковою є наявність базової діагностики: датчик тиску у пневмосистемі (точність $\pm 0,5\text{--}1\%$), датчик положення плунжера або контактних елементів (точність 0,01–0,05 мм), і контроль показників вібрації/температури при високошвидкісних режимах. Сучасні рішення передбачають вбудований модуль моніторингу з передачею даних по промислової шині (EtherCAT/Profinet/Modbus) для централізованого SCADA-логування. Аналіз трендів дозволяє прогнозувати деградацію ущільнень, зростання тертя клинових пар або ослаблення пружин, що суттєво знижує ризик аварійних відмов і непланових простоїв.

Балансування і віброустойчивість. Патрон та комплект кулачків повинні

бути збалансовані в зборі згідно з вимогами рівня балансу для даних робочих обертів; для великих обертів доцільний динамічний баланс у двох площинах. Також треба враховувати вплив вильоту заготовки і моментів інерції. Для зниження амплітуди вібрацій застосовують демпфуючі елементи, оптимальні матеріали і жорсткі кріплення. У проєкті слід вказати допустимі оберти для кожного комплекту кулачків і вкладишів.

Експлуатаційні та технічні вимоги (ТО). Режим технічного обслуговування повинен бути формалізований: щоденна візуальна перевірка та змащення контактів (за потреби), щомісячна перевірка TIR і калібрування датчиків, періодичне (наприклад, кожні 3–6 місяців або через 1000–5000 циклів, залежно від інтенсивності експлуатації) стендове випробування на ресурс і повне розбирання з перевіркою клинових поверхонь та ущільнень. Регламент змащення (тип мастила, об'єм, інтервал) має бути в паспорті патрона; наприклад, для клинових пар застосовують пластичні литі мастила з температурним діапазоном від $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+120\text{ }^{\circ}\text{C}$ і стійкі до СОЖ.

Заходи безпеки і правові/стандартні вимоги. Патрон і його інтеграція мають відповідати загальним вимогам машинобудівної безпеки: EN ISO 12100 (оцінка ризиків і зниження небезпек), EN ISO 13849-1 (безпечні логічні функції; категорії і рівні продуктивності PL), і, за потреби, IEC 62061 (функціональна безпека для машин). Фізичні засоби безпеки повинні включати механічні блокувальні елементи, які не дозволяють виконати робочий цикл при відкритій кришці або при відсутності фіксації кулачків; електронна частина – шинну логіку з контролем стану перед виконанням циклу. Аварійні вимкнення, таймаути, механічні стопори/ламелі і система «deadman» (блокування при відсутності оператора) підвищують безпеку в автоматичних змінах.

Охорона праці і ергономіка. Процедури заміни кулачків мають бути мінімізованими за кількістю ручних операцій і виконуватися з використанням інструментів, що зменшують ризик травми (спеціальні ключі, монтажні пристосування, підйомні вушка). Переналагодження у межах SMED-методології повинно бути організоване так, щоб оператор не підходив до зони різання при

ввімкненому шпинделі; маркування елементів, контрольні таблиці та інструкції мають бути доступні на робочому місці.

Документація, випробування і сертифікація. Поставник патрона повинен надати повний комплект документів: креслення приєднання, паспорт експлуатації з рекомендованими режимами, інструкції з інтеграції на ЧПУ (список М-кодів/параметрів), протоколи стендових випробувань (TIR, максимальний функціональний тиск, ресурсні тести) і сертифікати відповідності стандартам. Після монтажу на конкретний верстат слід провести приймально-здавальні випробування: перевірка механічної сумісності, електричних/пневматичних підключень, функціональної взаємодії з ЧПУ, коректності діагностичних сигналів й інтеграції у цикли обробки.

Економічні та організаційні аспекти. Впровадження швидкопереналагоджуваних патронів вимагає оцінки окупності: зниження часу переналагодження, підвищення коефіцієнта використання обладнання (ОЕЕ), зменшення відходів при частих перенастроїках. Рекомендується розробити політику складування комплектів кулачків, процедур ТО та запасів критичних деталей, що дозволить уникати простоїв і забезпечити безперервність виробництва.

Інтеграція ШЗП у систему ЧПК вимагає системного підходу: точні механічні допуски й балансування, надійний привод і стабільні пневмопневматичні параметри, продумана електронна взаємодія з контролером, реалізація функцій діагностики й безпеки згідно з нормами, формалізовані процедури ТО і експлуатації. Лише комплексне виконання цих вимог гарантує, що патрон при своїй високій швидкості переналагоджень не погіршить точності обробки й не створить додаткових ризиків для операторів і обладнання.

2 РОЗРАХУНОК І КОНСТРУЮВАННЯ ШВИДКОПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНОВОГО ПАТРОНА

2.1 Вибір головних розмірів і приєднувальних стандартів (DIN/ISO, тип фланця)

Проектування швидкопереналагоджуваного затискного патрона починається з визначення реальних конструктивних обмежень, що задаються шпиндельним вузлом конкретного токарного верстата з ЧПК. Саме ці параметри визначають тип приєднувального інтерфейсу, допустимі габарити патрона та характер розміщення центрувальних і посадкових поверхонь. На цьому етапі завдання полягає не в теоретичному аналізі стандартів, а у виборі конкретної посадки, яка забезпечує сумісність із верстатом та відповідає вимогам майбутніх силових розрахунків.

За даними шпиндельного вузла верстата, що використовується як база для проектування, посадочний фланець виконано за стандартом ISO 702-3 (короткий конус) із болтовим кріпленням та циліндричною центрувальною ділянкою. Така конфігурація визначає геометрію приєднувального інтерфейсу патрона, зокрема діаметри центрувальних поясів, діаметр болтового кола та товщину фланця. На кресленні (рис. 2.1) наведено фактичні розміри посадкових поверхонь: діаметри В, С та D, кутове розташування кріпильних отворів та величину монтажного торця. Ці розміри використовуються як вихідні для наступного конструювання корпусу патрона.

Вибір діаметра патрона здійснюється з урахуванням габаритів шпинделя та робочих параметрів верстата. За конструкцією привідного вузла допустимий діапазон патронів становить 200–250 мм. З огляду на характер майбутньої експлуатації – часті переналагодження, робота на підвищених обертах та вимога до зменшення інерційних навантажень – приймається діаметр 250 мм як оптимальний. Він забезпечує достатню опорну площу для кулачкового

механізму та водночас не перевищує масово-інерційні обмеження шпиндельного вузла.

Центрувальні поверхні фланця задають положення патрона відносно осі обертання. На осьовому розрізі (рис. 2.1) видно, що базування здійснюється по конічній та циліндричній ділянці, що забезпечує стабільну співвісність при багаторазових циклах монтажу. Використання цих поверхонь у конструкції патрона дозволяє гарантувати торцеве та радіальне биття в межах, встановлених виробником верстата.

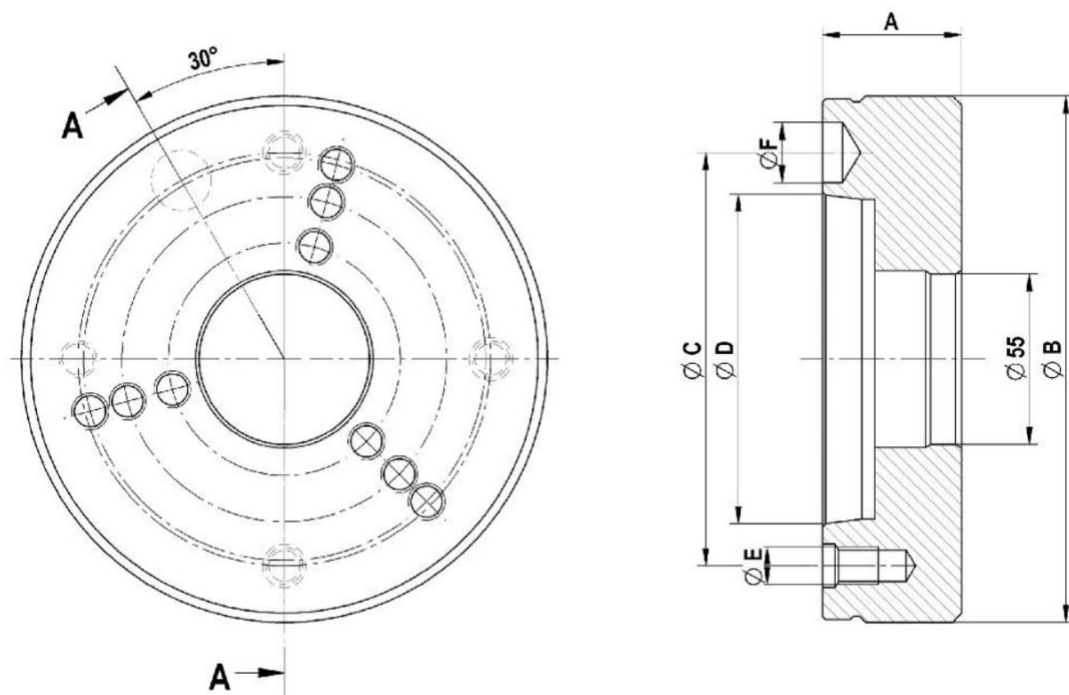


Рисунок 2.1 – Схема фланцевого приєднувального інтерфейсу патрона до шпинделя токарного верстата

У процесі проєктування для фланцевого приєднувального інтерфейсу була сформована власна геометрична схема (рис. 2.1), яка визначає посадкові, центрувальні та кріпильні поверхні патрона. На основі вимог до точності базування, жорсткості та сумісності зі шпиндельним вузлом було встановлено такі основні розміри фланця:

- діаметр шпиндельної посадки $B = 55$ мм, що відповідає центрувальній циліндричній ділянці;

- діаметри посадкових поверхонь С і D (згідно з кресленням, використовуються як базові площини для центрування та обмеження осьового положення патрона);
- довжина приєднувального фланця А (визначає глибину посадки та умови компоновки корпусу патрона);
- діаметр кріпильних отворів Е і їхнє кільцеве розташування (використовуються для болтового з'єднання патрона зі шпинделем);
- наявність конічної фаски F, що забезпечує самовстановлення під час монтажу.

Таке компонування забезпечує точне базування патрона відносно осі шпинделя, мінімальні осьові та радіальні зміщення після встановлення і достатню жорсткість з'єднання при роботі на підвищених обертах.

Оскільки геометрія інтерфейсу визначає положення корпусу патрона, кулачкового механізму та привода, у подальших розрахунках ці розміри приймаються як вихідні для компоновки корпусу, розташування клинового механізму й привода, а також для перевірки жорсткості та точності з'єднання.

2.2 Кінематична схема та баланс сил у приводі

У практичній конструкції швидкопереналагоджуваного патрона кінематична схема визначається не лише типом клинового механізму, а й сукупністю геометричних і силових параметрів, що впливають на реальний характер руху кулачків, величину переданого зусилля та стабільність затиску під час роботи на різних режимах обертання шпинделя. На відміну від теоретичного опису, на цьому етапі необхідно конкретизувати ключові конструктивні елементи, що беруть участь у силовому перетворенні, та оцінити їх вплив на подальший розрахунок привода.

Кожен вузол – осьовий привід, клинова пара, тяговий шток, повзуни, напрямні майстер-кулачків – працює в умовах сумісної дії тертя, інерційних

навантажень і пружних деформацій. Саме тому для аналізу кінематичної схеми доцільно виокремити базові параметри, які визначають кінцеву величину робочої сили затиску та її стабільність під час усього циклу обробки. Сукупність цих параметрів зведено до таблиці, що подає їх призначення, функціональну роль та практичний вплив на роботу патрона.

Таблиця 2.1 – Основні елементи та параметри кінематичної схеми затискного патрона

Позначення	Елемент / параметр	Функціональна роль у механізмі	Практичний вплив на роботу патрона
S_{oc}	Осьовий хід привода	Переміщує шток і клин	Визначає доступний діапазон радіального переміщення кулачків
i_k	Передаточне відношення клинового механізму	Задає перетворення осьового ходу в радіальний	Впливає на швидкість затиску та потрібну силу привода
α	Кут нахилу клина	Формує геометрію силового перетворення	Менші кути $\rightarrow$ більша сила; більші кути $\rightarrow$ більша швидкість
μ	Коефіцієнт тертя в парі «клин – повзун»	Характеристика ковзання	Збільшує втрати, знижує корисну силу
t_n	Товщина напрямних майстер-кулачків	Забезпечує жорсткість рухомих частин	Впливає на точність базування та стійкість при навантаженні
m_p	Приведена маса рухомих елементів	Визначає інерційні навантаження	Зростання маси $\rightarrow$ сильніші відцентрові сили на високих обертах
$F_{ред}$	Сила на клині	Результат дії привода	Є проміжною величиною перед радіальною силою затиску
F_r	Радіальна сила на кулачках	Безпосередньо утримує заготовку	Визначає технологічний момент, який патрон може сприйняти
δ_{pr}	Пружні деформації тяг і корпусу	Виникають у реальному циклі	Впливають на відтворюваність сили затиску при повторних циклах
ω	Кутова швидкість шпинделя	Задається режимом обробки	Прямо впливає на відцентрові сили та ефективну силу затиску

Наведені параметри утворюють основу для подальшого розрахунку силового привода та вибору геометрії клинового механізму. Саме вони визначають, яку силу потрібно створити пневмоциліндром, яким має бути

передаточне відношення клина, який хід забезпечує необхідне радіальне переміщення кулачків, а також які масові характеристики допустимі для роботи на заданих обертах.

Подальші розрахунки в наступному підрозділі виконуються вже з урахуванням цих конструктивних факторів, оскільки кожен з них впливає на втрати зусилля, швидкодію механізму та величину ефективної сили затиску. Таким чином, таблиця параметрів є практичним переходом від опису кінематики до кількісного аналізу та забезпечує можливість правильно обґрунтувати вибір привода патрона.

2.3 Розрахунок затискних сил, моментів і коефіцієнтів тертя

Розрахунок силових параметрів швидкопереналагоджуваного затискного патрона є одним із ключових етапів конструювання, оскільки саме від правильного визначення затискної сили, моментів опору та втрат, зумовлених тертям і інерційними явищами, залежить стабільність обробки, безпечність роботи та довговічність вузлів патрона. На відміну від принципів залежностей, наведених у першому розділі, де розглядалася загальна схема перетворення зусиль у клиновій парі, у даному підрозділі подаються інженерні розрахунки реальних експлуатаційних навантажень, що діють на патрон під час роботи на ЧПК-верстаті.

У робочому режимі патрона зусилля привода перетворюється у корисну радіальну силу, однак ця сила завжди менша за номінальну силу привода, оскільки частина енергії втрачається через тертя в напрямних плунжера, на поверхнях клинового механізму, у шарнірних контактних зонах майстер-кулачків та в ущільненнях пневматичного або пневматичного циліндра. Тому реальна робоча сила визначається виразом:

$$F_K = F_P - (F + F_T) \quad (2.1)$$

де F_P – зусилля виконавчого привода,

F – відцентрові навантаження, що виникають при обертанні шпинделя,

F_T – сумарні втрати, зумовлені тертям.

Така залежність дозволяє оцінити не ідеалізовану, а фактичну силу затиску, на яку може розраховувати технологічний процес.

Відцентрові навантаження стають визначальними при роботі на високих обертах, особливо у швидкісних режимах на рівні 1500–4500 об/хв. Інерційні сили, що діють на верхні кулачки, знижують ефективну силу затиску і збільшують ризик небезпечного розкриття патрона. Оцінюють їх за співвідношенням:

$$F = (m_K \cdot r \cdot w^2) \quad (2.2)$$

де m_K – приведена маса рухомих частин кулачкового вузла,

r – радіус розташування центру мас,

w – кутова швидкість.

Очевидно, що збільшення маси кулачків або радіуса їхнього ходу різко підвищує інерційне навантаження, тому конструкції швидкопереналагоджуваних патронів потребують максимальної оптимізації маси та застосування жорстких, але легких матеріалів.

Суттєвий вплив на роботу механізму має і тертя. На відміну від розділу 1, де тертя розглядалося в контексті передачі зусиль у клиновій парі, тут застосовується узагальнений коефіцієнт втрат, який враховує сумарний вплив усіх контактних зон силової передачі. У практичних розрахунках використовують модель:

$$F_T = k_T \cdot F_p \quad (2.3)$$

де k_T – коефіцієнт втрат (для сучасних патронів становить 0,08–0,15).

Для подальшої оцінки силових можливостей патрона було виконано числовий розрахунок реальної сили затиску з урахуванням відцентрових навантажень та втрат у силовому механізмі. При заданих параметрах привода $F_p = 60000$ Н, коефіцієнті втрат $k_T = 0,12$ та величині відцентрової сили $F = 35000$ Н отримано:

$$F_T = 0,12 \cdot 60000 \approx 7,2 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

Тоді реальна сила затиску визначається як:

$$\begin{aligned} F_K &= F_P(1 - k_T) - F \\ F_K &= 60000(1 - 0,12) - 35000 = 25000 \text{ Н} \end{aligned} \quad (2.4)$$

Отримане значення сили затиску $F_K = 25000 \text{ Н}$ дає можливість перейти до оцінки здатності патрона протидіяти технологічному моменту, що виникає під час різання. Для забезпечення надійного закріплення заготовки необхідно, щоб створена силовим механізмом радіальна сила забезпечувала сприйняття робочого моменту без проскальзування. Перевірка виконується шляхом визначення моменту, який може бути сприйнятий кулачками, за виразом:

$$M_p = F_K \cdot r_3 \quad (2.5)$$

де r_3 – робочий радіус дії сили різання.

На наступному етапі обчислюється коефіцієнт запасу міцності затискного механізму:

$$n_M = \frac{F_K \cdot r_3}{M_{\text{доп}}} \quad (2.6)$$

де $M_{\text{доп}}$ – допустимий момент, який може бути переданий кулачками без втрати контакту з заготовкою. Для патронів ЧПК-верстатів мінімально нормативним вважається запас $n_M \geq 2$, а для високошвидкісних режимів – не менше ніж $n_M = 3$.

У силовому аналізі важливу роль відіграє також коефіцієнт тертя в парах «кулачки – напрямні». Для шліфованих сталевих поверхонь у мастильному середовищі він становить 0,08–0,10; для зміцнених покриттів (CrN, TiN, DLC) – 0,04–0,06, що забезпечує стабільніше відтворення сили затиску, знижує втрати на тертя та зменшує нагрів при інтенсивних циклах переналагодження.

Таким чином, виконаний розрахунок силових параметрів дозволяє кількісно оцінити реальні можливості патрона, визначити межі допустимих навантажень, оцінити поведінку механізму в умовах високих обертів і забезпечити необхідний запас міцності для точної та безпечної обробки. Отримані залежності формують основу для подальшого конструювання модулів привода, перевірки елементів на міцність і вибору оптимальних параметрів клинового механізму.

2.4 Вибір і розрахунок привода (пневмо-, пневмо-, електромеханічний)

Поршень пневмоциліндра через шток з'єднується з тягами або приводним диском клинового механізму, що забезпечує перетворення поданого осьового зусилля у радіальний рух кулачків. Така компоновка дозволяє розмістити виконавчий елемент у межах габаритів шпиндельного вузла без збільшення його виносу, що позитивно впливає на жорсткість системи та зменшує амплітуду вібрацій під час різання. Рознесення навантажень уздовж осі шпинделя сприяє рівномірній роботі опорних підшипників та підвищує ресурс усього вузла.

Пневмопривід забезпечує стабільне створення зусилля затиску, зокрема під час високодинамічних переходів, характерних для швидкопереналагоджуваних систем. Постійність тиску в порожнинах пневмоциліндра компенсує частину втрат у клиновій передачі та забезпечує швидкий відгук виконавчого механізму. За потреби швидкість подачі рідини може регулюватися пропорційними пневмоклапанами, що узгоджуються з алгоритмами ЧПК й дозволяють підтримувати оптимальну кінематику затискання та розтискання навіть при інтенсивних циклах роботи.

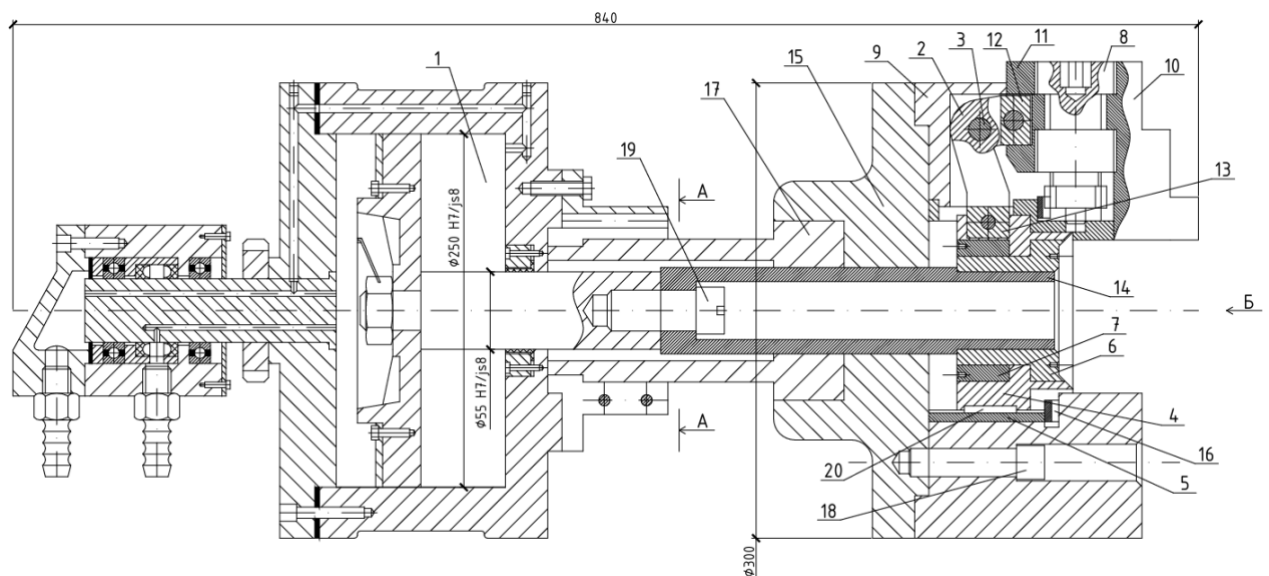


Рисунок 2.2 – Конструктивна схема пневматичного привода затискного

патрона

Конструктивні особливості виконавчого механізму пневмопривода, принцип передавання зусилля та схема роботи поршня відображені на рисунку 2.2, що дозволяє наочно оцінити взаємодію його елементів перед початком розрахункових процедур.

Після визначення необхідної сили затиску та оцінки її достатності для сприйняття технологічного моменту переходять до розрахунку параметрів виконавчого привода. Основним розрахунковим значенням є тиск у пневмосистемі та розмір поршня, що забезпечує створення розрахованої сили F_p з урахуванням коефіцієнтів втрат та динамічних навантажень.

У попередньому підрозділі було отримано реальну силу затиску $F_k = 25000$ Н, що забезпечує запас міцності механізму за моментом. Для визначення необхідного зусилля привода враховують втрати в клиновому механізмі, тому сила, що має бути створена пневмоциліндром, становить:

$$F_{\text{потр}} = \frac{F_k}{1 - k_t} \quad (2.7)$$

де k_t – коефіцієнт втрат механізму, прийнятий $k_t = 0,12$.

$$F_{\text{потр}} = \frac{25000}{1 - 0,12} = \frac{25000}{0,88} \approx 28409 \text{ Н.}$$

Це значення є мінімально необхідною силою, яку повинен розвивати пневмопривод у робочій порожнині циліндра для забезпечення розрахованої сили затиску на кулачках. Далі визначаємо розміри пневмоциліндра, виходячи з прийнятого робочого тиску системи p_p . Площа поршня обчислюється за співвідношенням:

$$A = \frac{F_{\text{потр}}}{p_p} \quad (2.8)$$

де A – ефективна площа поршня,

$F_{\text{потр}}$ – потрібна сила привода, розрахована за формулою (2.7),

p_p – робочий тиск у магістралі.

За нашими даними, $p_p = 5 \text{ МПа} = 5 \cdot 10^6 \text{ Па}$ одержуємо

$$A = \frac{28409}{5 \cdot 10^6} \approx 0,00568 \text{ м}^2$$

Діаметр поршня визначаємо через рівняння площі круга:

$$D^2 = \frac{4A}{\pi} \quad (2.9)$$

де D – діаметр поршня,

π (π) = 3,1416

$$D^2 = \frac{4 \cdot 0,00568}{3,1416} \approx 0,0072 \text{ м}^2$$

звідки діаметр поршня

$$D \approx 0.085 \text{ м} = 85 \text{ мм.}$$

З урахуванням стандартного ряду та необхідного запасу міцності приймаємо діаметр поршня $D = 90$ мм. Для цього діаметра ефективна площа поршня становитиме:

$$A_{\text{пр}} = \frac{\pi D_{\text{пр}}^2}{4} \quad (2.10)$$

$$A_{\text{пр}} = \frac{3.1416 \cdot 0,09^2}{4} \approx 0.0064 \text{ м}^2$$

що забезпечує додатковий запас за силою порівняно з розрахунковим значенням.

Хід поршня s визначається необхідним радіальним переміщенням кулачків, що задається конструкцією затискного механізму. Зв'язок між осьовим ходом поршня та радіальним переміщенням кулачків встановлюється через передаточне відношення клинового механізму i_k .

За прийнятого передаточного відношення $i_k = 10$ та радіального ходу кулачків, що становить 3 мм, отримаємо:

$$s = i_k \cdot r_{\text{рад}} \quad (2.11)$$

$$s = 10 \cdot 3 = 30 \text{ мм} = 0,03 \text{ м}$$

За заданого часу циклу затискання $t_3 = 0,4$ мінімальна необхідна витрата робочої рідини визначається як:

$$Q = \frac{A_{\text{пр}} \cdot s}{t_3} \quad (2.12)$$

де Q – об'ємна подача насоса.

$$Q = \frac{0,0064 \cdot 0,03}{0,4} \approx 4,8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \approx 29 \frac{\text{л}}{\text{хв}}$$

Отримана витрата визначає необхідну продуктивність насосної станції для

забезпечення заданого часу спрацювання механізму затискання. Орієнтовна потужність пневматичного привода розраховується за формулою:

$$P_r = \frac{p_p \cdot Q}{n} \quad (2.13)$$

Де n – ККД пневмосистеми (приймаємо $n = 0,8$. Тоді

$$P_r = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 4,8 \cdot 10^{-4}}{0,8} \approx 3,0 \text{ кВт}$$

Таким чином, для забезпечення розрахованої сили затиску і часу циклу доцільно застосувати пневмопривод з поршнем діаметром 90 мм, ходом 30 мм, насосною подачею не менше 30 л/хв та встановленою потужністю електродвигуна близько 3 кВт. Ці параметри узгоджуються з отриманими раніше силовими розрахунками та забезпечують необхідний запас надійності привода швидкопереналагоджуваного патрона.

Проведений розрахунок параметрів виконавчого пневмопривода дозволив обґрунтувати вибір оптимальних геометричних та силових характеристик, необхідних для забезпечення стабільної роботи швидкопереналагоджуваного затискного патрона. Визначена у попередньому підрозділі реальна сила затиску становила 25 000 Н, що є достатнім значенням для сприйняття технологічного моменту без проскальзування заготовки. З урахуванням втрат у клиновому механізмі було встановлено, що пневмоциліндр повинен розвивати силу не менше 28 409 Н, оскільки саме це значення гарантує наявність необхідного запасу міцності при роботі механізму в умовах динамічних навантажень.

Подальші розрахунки показали, що за робочого тиску пневмосистеми 5 МПа ефективна площа поршня має становити близько 0,00568 м², що відповідає діаметру приблизно 85 мм. Враховуючи стандартний ряд і необхідність забезпечення додаткового запасу за силою, раціональним є прийняття діаметра поршня 90 мм. Такий вибір підвищує стійкість привода до коливань тиску, сприяє рівномірному навантаженню клинового механізму та зменшує ймовірність перевищення допустимих напружень у силовому ланцюзі.

Хід поршня визначався виходячи з радіального переміщення кулачків механізму затиску та передаточного відношення клинкової передачі. За $i_k = 10$ та

радіальному зміщенню кулачків у межах 3 мм необхідний осьовий хід поршня становив 30 мм, що забезпечує повну реалізацію затискного руху без перевантаження механізму. Аналіз динаміки спрацювання привода засвідчив, що для досягнення часу циклу затискання 0,4 с мінімальна витрата робочої рідини складає близько 29 л/хв. Це значення визначає вимоги до насосної станції та дозволяє уникнути уповільнення руху виконавчих елементів у режимах швидких переналагоджень.

Орієнтовна потужність пневматичного привода була визначена з урахуванням ККД пневмосистеми, прийнятого на рівні 0,8, і становила приблизно 3 кВт. Таке значення забезпечує можливість стабільної подачі рідини під необхідним тиском і гарантує, що пневмоциліндр буде працювати без перевантаження навіть у високошвидкісних режимах ЧПК-обробки.

Отримані результати свідчать про доцільність застосування саме пневматичного привода, оскільки він забезпечує найбільш стабільні та передбачувані силові характеристики, високий рівень повторюваності затискних зусиль, точність спрацювання та достатній запас міцності. Вибрані параметри – діаметр поршня 90 мм, хід 30 мм, робочий тиск 5 МПа, подача 29 л/хв і потужність близько 3 кВт – узгоджуються з проведеними силовими розрахунками і повністю відповідають вимогам до конструкції швидкопереналагоджуваного патрона. Таке виконання забезпечує не тільки надійний силовий вплив на кулачковий механізм, але й стабільну роботу патрона в умовах частих циклів переналагоджень та підвищених швидкостей обробки.

2.5 Розрахунок на міцність і жорсткість (корпус, кулачки, тягові елементи)

Метою підрозділу є перевірка того, чи забезпечують прийняті геометричні параметри кулачків, корпуса та тягових елементів надійну роботу патрона при дії сили затиску $F_k = 25000$ Н та сили привода $F_{\text{потр}} \approx 28409$ Н.

Спершу Перевіряємо кулачки. Радіальна сила, що припадає на один кулачок, визначається рівномірним розподілом загальної сили затиску між трьома кулачками:

$$F_{\text{ж}} = \frac{F_k}{3} \quad (2.14)$$

Підставляємо значення, отримуємо:

$$F_{\text{ж}} = \frac{25000}{3} \approx 8330 \text{ Н}$$

Найбільш небезпечним вважається переріз у корені кулачка біля місця його з'єднання з майстер-кулачком. Для розрахунку міцності приймається прямокутний переріз із розмірами $b = 30 \text{ мм}$, $h = 40 \text{ мм}$. Плече дії сили відносно цього перерізу становить $l_{\text{ж}} = 40 \text{ мм}$.

Згинальний момент визначаємо формулою:

$$M_{\text{ж}} = F_{\text{ж}} \cdot l_{\text{ж}} \quad (2.15)$$

Підставивши наші значення, отримаємо:

$$M_{\text{ж}} = 8330 \cdot 0,04 \approx 333 \text{ Нм}$$

Для визначення напружень необхідно знайти момент опору прямокутного перерізу відносно осі згину. Він обчислюється за формулою:

$$W_{\text{ж}} = \frac{b \cdot h^2}{6} \quad (2.16)$$

$$W_{\text{ж}} = \frac{0,03 \cdot 0,04^2}{6} \approx 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$$

Коефіцієнт запасу міцності за згином визначаємо за формулою:

$$a_{\text{зг}} = \frac{M_{\text{ж}}}{W_{\text{ж}}} \quad (2.17)$$

$$a_{\text{зг}} = \frac{333}{8,0 \cdot 10^{-6}} \approx 42 \text{ МПа}$$

Допустиме напруження для легованої конструкційної сталі після термообробки приймається за довідковими даними. Для сталей типу 40Х, 30ХГСА, 20ХН3А, що застосовуються для виготовлення кулачків патронів, рекомендований діапазон допустимих напружень на згин становить 160–200 МПа. У подальших розрахунках приймаємо середнє значення $a_{\text{доп}} = 180 \text{ МПа}$.

Коефіцієнт запасу міцності за згином визначаємо за формулою:

$$n = \frac{a_{\text{доп}}}{a_{\text{зг}}} \quad (2.18)$$

де $a_{\text{зг}}$ – розрахункове напруження згину в кулачку,

$a_{\text{доп}}$ – це допустиме напруження на згин для матеріалу кулачка, яке забезпечує безпечну роботу деталі без руйнування.

$$n = \frac{180}{42} \approx 4,3$$

Таким чином, міцність кулачків за згином забезпечується з достатнім запасом. Жорсткість кулачка перевіряється за величиною прогину його хвостової частини, як консольна балка.

Момент інерції перерізу визначаємо за формулою:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (2.19)$$

де b – ширина перерізу кулачка,

h – висота перерізу кулачка.

$$J = \frac{0,03 \cdot 0,04^3}{12} \approx 1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^4$$

Прогин у вільному кінці при модулі пружності сталі $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па розраховується за формулою:

$$f = \frac{F_j \cdot l_j^3}{3 \cdot E \cdot J} \quad (2.20)$$

Прогин у вільному кінці при модулі пружності сталі $E = 2 \cdot 10^{11}$ Па розраховується за формулою:

де F_j – сила, що діє на один кулачок,

l_j – довжина вильоту (плече дії сили) кулачка,

E – модуль пружності сталі,

J – момент інерції перерізу кулачка.

$$f \approx 5,6 \cdot 10^{-6} \text{ м} \approx 0,006 \text{ м}$$

Отриманий прогин у декілька разів менший за допустиме радіальне зміщення (0,02–0,03 мм), тому жорсткість кулачків є достатньою і не впливає на точність базування заготовки.

Далі виконуємо перевірку тягових елементів. Силу, що сприймає одна тяга, визначаємо з умови рівномірного розподілу зусилля привода між трьома тягами:

$$F_t = \frac{F_{\text{потр}}}{3} \quad (2.21)$$

Підставляючи розрахункове зусилля привода $F_{\text{потр}} = 28409 \text{ Н}$, одержуємо:

$$F_t = \frac{28409}{3} \approx 9470 \text{ Н}$$

Площа поперечного перерізу тяги круглого перерізу діаметром $d_t = 20 \text{ мм} = 0,02 \text{ м}$ обчислюється за формулою:

$$A_t = \frac{\pi d_t^2}{4} \quad (2.22)$$

Отримаємо:

$$A_t = \frac{3,1416 \cdot 0,02^2}{4} \approx 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Середнє дотичне напруження зрізу в тязі визначається за формулою:

$$t_t = \frac{F_t}{A_t} \quad (2.23)$$

Підставляючи числові значення, отримуємо:

$$t_t = \frac{9470}{3,14 \cdot 10^{-4}} \approx 3,0 \cdot 10^7 \text{ Па} \approx 30 \text{ МПа}$$

Для сталі, з якої виготовляються тягові елементи, допустиме дотичне напруження на зріз приймається на рівні $t_{\text{доп}} \approx 90 \text{ МПа}$. Коефіцієнт запасу міцності за зрізом визначається як

$$n_t = \frac{t_{\text{доп}}}{t_t} \quad (2.24)$$

Після підстановки значень маємо:

$$n_t = \frac{90}{30} \approx 3$$

Отже, діаметр тяг 20 мм забезпечує запас міцності за зрізом не менше трьох відносно розрахункового навантаження, що є достатнім для надійної роботи силової ланки «привод – клиновий механізм – кулачки».

Після перевірки тяг виконуємо розрахунок міцності корпусу патрона. Корпус сприймає радіальні зусилля від пазів кулачків і передає їх на фланцеве приєднання до шпинделя. Для спрощеної оцінки приймається, що три радіальні сили від кулачків діють рівномірно по колу радіуса $r = 0,125 \text{ м}$, що відповідає половині діаметра патрона 250 мм. Тому, сумарна радіальна сила визначається як:

$$F_{\text{сум}} = 3 \cdot F_{\text{ж}} \quad (2.25)$$

де $F_{\text{сум}}$ – сумарна радіальна сила, яку сприймає корпус патрона,

$F_{\text{ж}}$ – сила, що діє на один кулачок.

$$F_{\text{сум}} = 3 \cdot 8330 \approx 25000 \text{ Н}$$

Середній контактний тиск у зоні опорного кільця корпуса шириною $t = 0,03$ м (30 мм) визначається за формулою:

$$p_{\text{ср}} = \frac{F_{\text{сум}}}{2 \pi r t}, \quad (2.26)$$

де $F_{\text{сум}}$ – сумарна радіальна сила, що сприймається корпусом патрона ($F_{\text{сум}} = 25\,000 \text{ Н}$),

r – радіус розташування сил відносно осі патрона ($r = 0,125 \text{ м}$),

t – ширина опорного кільця корпуса ($t = 0,03 \text{ м}$).

$$p_{\text{ср}} = \frac{25000}{2 \cdot 3,1416 \cdot 0,125 \cdot 0,03} \approx 1,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \approx 11 \text{ МПа}$$

Для корпусів, виготовлених із конструкційної сталі або високоміцного чавуну, допустимі контактні напруження становлять 60–80 МПа, тому отриманий тиск має значний запас міцності, і робота корпуса за стиском є безпечною.

Отже, проведені розрахунки міцності та жорсткості кулачків, тяг і корпуса показують, що всі елементи патрона мають достатній запас міцності та працюють у безпечних напружених станах. Напруження згину в кулачках значно менше допустимого, прогин їх хвостової частини мінімальний і не впливає на точність базування, тяги витримують діюче навантаження із запасом, а контактний тиск у зоні опорного кільця корпуса є в декілька разів нижчим за допустимий.

Таким чином, прийняті конструктивні параметри забезпечують надійну та стабільну роботу патрона в умовах експлуатації.

2.6 Точність, співвісність і радіальне/торцеве биття

Точність роботи швидкопереналагоджуваного затискного патрона визначається здатністю забезпечувати співвісність осі закріпленої заготовки з віссю шпинделя та мінімізувати радіальне й торцеве биття робочих поверхонь. Від цих показників безпосередньо залежать геометрична точність оброблених поверхонь, шорсткість, стійкість різального інструмента та ресурс вузла «шпиндель – патрон – заготовка».

Співвісність у даному випадку розуміється як збіг осі обертання шпинделя верстата з віссю обертання зовнішніх базувальних поверхонь заготовки, затиснутої в кулачках. Порушення співвісності зумовлене сумарним впливом похибок виготовлення та складання шпиндельного вузла, неточності центрування корпусу патрона на фланці, похибок пазів майстер-кулачків, зносу напрямних і деформацій силової ланки під дією затискних зусиль. У спрощеному вигляді сумарну похибку співвісності можна представити як кореневу суму окремих складових

$$\Delta_{\Sigma} \approx \sqrt{\Delta_{\text{шп}}^2 + \Delta_{\text{пат}}^2 + \Delta_{\text{кул}}^2 + \Delta_{\text{деф}}^2}, \quad (2.27)$$

де $\Delta_{\text{шп}}^2$ – похибка шпиндельного вузла, $\Delta_{\text{пат}}^2$ – похибка базування корпусу патрона на фланці, $\Delta_{\text{кул}}^2$ – похибка форми та розташування кулачків, $\Delta_{\text{деф}}^2$ – зміщення, зумовлене пружними деформаціями елементів механізму.

За результатами розрахунків і довідкових даних можна прийняти орієнтовні значення:

$$\Delta_{\text{шп}} = 0,005 \text{ мм},$$

$$\Delta_{\text{пат}} = 0,006 \text{ мм},$$

$$\Delta_{\text{кул}} = 0,007 \text{ мм},$$

$$\Delta_{\text{деф}} \approx 0,01 \quad (\text{прогин кулачків і тяг за підрозділом 2.5}).$$

Тоді

$$\Delta_{\Sigma} \approx \sqrt{0,005^2 + 0,006^2 + 0,007^2 + 0,01^2} \approx 0,015 \text{ мм},$$

що менше за типовий допустимий рівень радіального биття високоточних патронів (0,02–0,03 мм). Отже, сумарна геометрична та деформаційна похибка

співвісності не виходить за межі прийнятих допусків.

Радіальне биття патрона характеризується відхиленням радіального положення контрольної поверхні заготовки або калібра, затиснутого в кулачках, від ідеальної окружності при обертанні на одному повному обороті. Вимірювання здійснюється індикатором годинникового типу, установленим на заданому радіусі. Отримане значення радіального биття включає похибки форми та розташування робочих поверхонь кулачків, люфти в напрямних, пружні деформації тяг і корпусу, а також вплив відцентрових сил при підвищених обертах. Проведені в підрозділі 2.5 розрахунки показали, що прогин кулачків не перевищує десятих часток сотих міліметра (порядку 0,01 мм), тобто є в 2–3 рази меншим за допустиме радіальне зміщення 0,02–0,03 мм, тому деформаційна складова радіального биття не є визначальною.

Торцеве биття оцінюється як відхилення торцевої опорної поверхні патрона або контрольного кільця від ідеальної площини, перпендикулярної до осі обертання. Воно виникає внаслідок неповної перпендикулярності торця шпинделя та фланця, похибок обробки опорних поверхонь корпусу патрона, а також несиметричного затягування кріпильних болтів. Конструкція патрона з опорою корпусу на шліфований торець шпинделя та центрованим пояском, а також обробка посадкових поверхонь за одне установлення на шліфувальному верстаті дозволяють забезпечити торцеве биття на рівні не більше 0,02 мм.

З метою забезпечення потрібної точності затиску при прийнятих силових параметрах патрона особливе значення мають технологічні заходи щодо обробки та складання. Корпус патрона, посадкові пояски, гнізда майстер-кулачків і опорні кільця повинні оброблятися в одній установці, базуючись по центрувальній поверхні, сумісній із посадкою на шпиндель. Це забезпечує мінімальну похибку співвісності між внутрішніми й зовнішніми базувальними поверхнями та знижує радіальне й торцеве биття при монтажі на верстат.

Важливу роль відіграє також точність виготовлення та регулювання самих кулачків. Профіль їхніх робочих поверхонь виконується шліфуванням у зібраному стані патрона на спеціальних пристосуваннях; при цьому кулачки

розточуються «по місцю» на номінальному діаметрі, що забезпечує мінімальну похибку форми та рівномірний розподіл контактного тиску по довжині базувальної ділянки. Застосування такої технології дозволяє знизити радіальне биття при серійному виготовленні патронів до рівня 0,01–0,02 мм у діапазоні робочих діаметрів.

Сумарна точність патрона в експлуатації визначається не лише початковими геометричними параметрами, а й стабільністю їх збереження в часі. Зношування напрямних майстер-кулачків, поява задирок на робочих поверхнях, зниження жорсткості з'єднань можуть поступово збільшувати радіальне та торцеве биття. Для компенсації цього в конструкції передбачаються можливості регулювання й періодичного відновлення точності – доведення опорних поверхонь, шліфування робочих ділянок кулачків, контроль співвісності за допомогою калібрів і індикаторів.

Таким чином, прийнята конструкція швидкопереналагоджуваного патрона з центрованим корпусом, жорсткими кулачками консольного типу та оптимізованими перерізами тяг забезпечує необхідний рівень співвісності й допустимі значення радіального та торцевого биття. Розраховані деформації кулачків і тяг не перевищують допусків на радіальне зміщення, а конструктивно-технологічні заходи з обробки й складання дозволяють реалізувати на практиці точність, достатню для виконання токарних операцій підвищеної точності на ЧПК-верстаті.

2.7 Конструкція модуля швидкої зміни кулачків/вкладишів

Однією з основних вимог до швидкопереналагоджуваного патрона є можливість оперативної заміни робочих кулачків або вкладишів без демонтажу патрона зі шпинделя та без повторної довготривалої юстування. Це особливо актуально для серійного та дрібносерійного виробництва, де номенклатура заготовок часто змінюється, а час простою верстата безпосередньо впливає на собівартість продукції. З цією метою в конструкції патрона передбачено модуль

швидкої зміни кулачків/вкладишів, який забезпечує повторюваність базування, достатній запас міцності та стабільність роботи при підвищених обертах шпинделя.

Базовим елементом модуля є майстер-кулачок, жорстко зв'язаний із клиновим приводним механізмом патрона. На його робочій поверхні виконано стандартизовану базувальну зону для встановлення змінних вкладишів: комбінований паз типу «ластівчин хвіст» або шипово-пазове з'єднання з додатковим циліндричним штифтом. Така геометрія забезпечує самогальмівний ефект при дії радіальних сил затиску та не допускає зсуву вкладиша під дією відцентрових і інерційних навантажень. Осьове закріплення здійснюється фронтальними притискними гвинтами з внутрішнім шестигранником, розташованими у гніздах майстер-кулачка, або ексцентриковими замками швидкої дії.

Змінний вкладиш (верхній кулачок) виконується як окрема деталь, що несе безпосередні контактні поверхні для базування та затиску заготовки. Хвостова частина вкладиша має форму, узгоджену з базувальним пазом майстер-кулачка, та точні шліфовані поверхні. Конструкцією передбачено декілька типів вкладишів: гладкі для циліндричних заготовок, призматичні для шестигранних профілів, з рифленням для підвищеного зчеплення, а також спеціальні – з радіусними, фасонними або комбінованими поверхнями. Робочі ділянки виготовляються зі зносостійких легованих сталей із локальною термообробкою, що забезпечує необхідну твердість і втомну міцність.

На рисунку 2.3 показано загальний вигляд модуля швидкої зміни кулачків/вкладишів токарного патрона.



Рисунок 2.3 – Конструкція модуля швидкої зміни кулачків/вкладишів токарного патрона

Як видно з рисунка 2.3, основне робоче навантаження сприймається базувальними поверхнями типу «форма–замикання» (похилі та циліндричні ділянки), тоді як кріпильні гвинти виконують переважно притискну й страховочну функції. Такий розподіл навантажень дозволяє зменшити вимоги до моменту затягування гвинтів, скоротити час переналагодження та підвищити надійність роботи модуля при вібраціях і динамічних навантаженнях. Для виключення помилкової установки вкладишів передбачена асиметрія базувальних елементів (зміщення штифта, різна довжина опорних ділянок тощо), що унеможливорює монтаж у неправильному положенні.

Процес заміни кулачків здійснюється за спрощеним алгоритмом. Після

переведення патрона в безпечний стан (розтиск заготовки, зниження тиску в пневмосистемі) оператор послаблює притискні гвинти або відводить ексцентрики замки спеціальним ключем. Змінні вкладиші зсуваються із пазів майстер-кулачків у радіальному чи осьовому напрямку і знімаються вручну. Нові вкладиші встановлюються в базувальні гнізда до упору в штифт або опорну площину, після чого гвинти затягуються з регламентованим моментом. Уся операція заміни комплекту вкладишів займає кілька хвилин і не потребує демонтажу патрона зі шпинделя чи повторного розточування робочих поверхонь.

Для забезпечення необхідної точності базування майстер-кулачків і вкладишів базувальні поверхні обробляються та шліфуються у зібраному стані патрона. Розточування робочих поверхонь вкладишів «по місцю» на номінальному діаметрі забезпечує мінімальну похибку форми та рівномірний розподіл контактного тиску по довжині базувальної ділянки. За рахунок цього повторюваність положення робочих поверхонь при багаторазовій заміні вкладишів утримується на рівні 0,02–0,03 мм, що відповідає вимогам до токарних патронів підвищеної точності.

Міцність елементів модуля розраховується з урахуванням сумісної дії радіальних сил затиску, відцентрових навантажень при роботі на високих обертах та можливих ударних імпульсів у момент затискання/розтискання. У конструкції хвостовиків і базувальних пазів уникнуто різких концентраторів напружень, передбачено плавні переходи перерізів, а матеріал обрано з підвищеною втомною міцністю. Це забезпечує необхідний запас міцності й довговічність модуля в умовах інтенсивної експлуатації.

Запропонована конструкція модуля швидкої зміни кулачків/вкладишів органічно інтегрується в силову схему патрона, не погіршуючи його жорсткість і точність, але істотно розширюючи технологічні можливості. Оператор отримує можливість швидко адаптувати патрон до різних типорозмірів заготовок, підтримуючи стабільний рівень точності й безпеки обробки на ЧПК-верстаті без складних налагоджувальних операцій.

2.8 Матеріали, термообробка та зносостійкі покриття

Надійність і довговічність швидкопереналагоджуваного патрона в значній мірі визначаються правильним вибором матеріалів, режимів термічної обробки та застосуванням зносостійких і антифрикційних покриттів. Оскільки основні елементи патрона працюють в умовах змінних силових навантажень, ударів, тертя ковзання та кочення, а також впливу мастильно-охолоджувальних рідин, до матеріалів висуваються вимоги підвищеної міцності, втомної та контактної витривалості, зносостійкості та стабільності геометрії в часі.

Корпус патрона сприймає сумарні радіальні зусилля від кулачків і передає їх на шпіндельний вузол, тому до нього висуваються вимоги достатньої міцності на стиск і вигин, жорсткості та демпфуючої здатності. Для корпусів широко застосовують високоміцний чавун марок ВЧ50–ВЧ60 або конструкційну сталь 40Л. Чавун забезпечує хороше поєднання міцності, жорсткості й здатності гасити вібрації; за потреби підвищеної ударної в'язкості застосовують сталеві литі заготовки з подальшою нормалізацією та зняттям внутрішніх напружень.

Майстер-кулачки та змінні вкладиші працюють в умовах концентрованих контактних навантажень, повторних ударів при затисканні та можливих ковзань заготовки, тому матеріал повинен мати високі показники поверхневої твердості та контактної витривалості при достатній в'язкості серцевини. Для цих деталей доцільно використовувати леговані конструкційні сталі типу 40Х, 20ХН3А, 30ХГСА з поверхневим зміцненням (цементация, азотування або ТВЧ-гарт). Робочий шар після термообробки має твердість 58–62 HRC на глибину 1,0–1,5 мм, тоді як серцевина залишається в'язкою (30–35 HRC), що запобігає крихкому руйнуванню при ударних навантаженнях.

Елементи клинового механізму (клин, повзуни, шток у зоні роботи в направляючих) працюють у умовах значних контактних напружень і тертя ковзання, тому для них застосовують сталі 35ХГСА, 18ХГТ, 40Х із гартуванням і низьким відпуском до твердості 45–50 HRC. Такий рівень твердості забезпечує

достатню втомну міцність та стійкість до вдавлювань при збереженні технологічності механічної обробки й шліфування.

Тягові елементи (тяги, шпильки, різьбові з'єднання силової ланки) працюють переважно на розтяг і зріз при циклічному навантаженні. Для них доцільно використовувати сталі 40X, 38XC, 30XГСА з поліпшенням (гарт + високий відпуск) до твердості 32–38 HRC. Це забезпечує високий запас міцності за розтягом і зрізом, достатню пластичність різьбових зон та стійкість до втомних тріщин.

Для зниження коефіцієнта тертя та підвищення зносостійкості в парах «клин – повзун», «кулачок – напрямна», «вкладиш – заготовка» доцільно застосовувати поверхневі покриття та хіміко-термічну обробку. Найбільш поширеними є азотування (газове, іонне), нітрокарбюризация, а також нанесення тонких твердих покриттів CrN, TiN, TiCN, DLC методом PVD/CVD. Покриття знижують коефіцієнт тертя до 0,04–0,08, підвищують опір заїданню та корозійну стійкість у присутності СОЖ, що в сукупності збільшує ресурс механізму й стабільність затискних зусиль.

Узагальнені дані щодо вибору матеріалів, термічної обробки та покриттів для основних елементів патрона наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Матеріали, термообробка та покриття основних елементів швидкопереналагоджуваного патрона

Елемент патрона	Рекомендований матеріал	Термічна / хіміко-термічна обробка	Орієнтовна твердість	Покриття / обробка поверхні	Особливі вимоги / Призначення
Корпус патрона	Високоміцний чавун ВЧ50–ВЧ60; сталь 40Л	Нормалізація, старіння, зняття напружень	190–230 HB	Фосфатування, фарбування зовнішніх поверхонь	Висока жорсткість, демпфування вібрацій, стабільність геометрії
Фланцевий пояс, опорне кільце	Сталь 40X, 45	Поліпшення (гарт + високий відпуск), шліфування	28–34 HRC	Шліфувана поверхня, можливе фосфатування	Точність посадки на шпindel, зносостійкість опорних поверхонь

Майстер-кулачки	Сталь 40Х, 20ХН3А, 30ХГСА	Цементация 0,8–1,2 мм + гарт + низький відпуск	Серцевина 30–35 HRC; поверхня 58–62 HRC	Можливе TiN/CrN на робочих поверхнях	Висока контактна витривалість, міцність у зоні з'єднання з вкладишем
Змінні вкладиші (верхні кулачки)	Сталь 20ХН3А, 18ХГТ, 40Х	Цементация або азотування, гарт, низький відпуск	Поверхня 58–62 HRC	Рифлення; покриття TiN, CrN, DLC	Зносостійкість і зчеплення із заготовкою, стійкість до вдавлювань
Клин клинового механізму	Сталь 35ХГСА, 40Х	Гарт + низький відпуск; локальне шліфування	45–50 HRC	Іонне азотування, нітрокарбюризація	Висока міцність, зносостійкість у парі ковзання
Повзуни, напрямні майстер-кулачків	Сталь 40Х, 18ХГТ	Гарт + низький відпуск; шліфування	42–48 HRC	Азотування, тонкі тверді покриття	Мала зношуваність, стабільна кінематика переміщення
Тяги, шпильки силового привода	Сталь 40Х, 30ХГСА	Поліпшення (гарт + високий відпуск)	32–38 HRC	Фосфатування, оксидування	Висока міцність на розтяг і зріз, втомна витривалість
Шток пневмоциліндра	Сталь 38ХС, 40Х	Поліпшення + шліфування	30–36 HRC	Хромування, полірування	Корозійна стійкість, мала шорсткість, опір задирам
Пружні елементи (якщо є в схемі)	Пружинна сталь (65Г, 60С2А)	Гарт + відпуск	42–48 HRC	Без покриття або фосфатування	Висока пружна витривалість, відсутність втомних тріщин

Застосування наведених матеріалів і режимів обробки дозволяє забезпечити узгодженість міцнісних і триботехнічних властивостей усіх ланок силового й кінематичного ланцюга патрона. Тверді зносостійкі шари на поверхнях кулачків, клинів і напрямних поєднуються з більш в'язкою серцевиною, що сприймає основні об'ємні напруження, а спеціальні покриття знижують коефіцієнт тертя та ризик заїдання. У сукупності це забезпечує

стабільність затискних зусиль, збереження точності й співвісності в процесі тривалої експлуатації та зменшує витрати на обслуговування і ремонт патрона.

2.9 Технологічність виготовлення та збирання; контроль якості

Технологічність конструкції швидкопереналагоджуваного патрона визначає трудомісткість його виготовлення, точність отримуваних поверхонь, стабільність параметрів при збиранні та ремонті, а також кінцеву собівартість виробу. При розробці конструкції враховано можливість обробки основних деталей стандартними методами верстатної обробки з мінімальною кількістю переналагоджень, використання уніфікованих елементів і забезпечення необхідної точності за рахунок раціонального вибору баз і послідовності операцій.

Корпус патрона доцільно виготовляти з литої заготовки з високоміцного чавуну або сталі з урахуванням припусків на механічну обробку. Першими виконуються чорнові токарні операції: обробка зовнішнього діаметра, посадкового пояса під фланець шпинделя, чорнове розточування внутрішньої порожнини. Далі корпус піддається термообробці (нормалізація, зняття внутрішніх напружень), після чого виконуються чистові токарні та шліфувальні операції з базуванням по посадковому поясу, сумісному з посадкою на шпиндель. Такий підхід забезпечує співвісність внутрішніх і зовнішніх базових поверхонь, що є критичним для точності патрона. Фрезерування пазів під майстер-кулачки, виконання отворів під кріпильні елементи та канали для підведення робочої рідини здійснюються на багатокоординатних верстатах із ЧПК, що дозволяє витримувати необхідні допуски на взаємне розташування елементів.

Майстер-кулачки, клин, повзуни, тяги та змінні вкладиші виготовляються з прокатних або штампованих заготовок із подальшою токарною, фрезерною та шліфувальною обробкою. Технологічність забезпечується введенням наскрізних

отворів і площин для зручного базування, мінімізацією кількості переходів із зміною баз, а також застосуванням універсальних і спеціальних пристосувань, що забезпечують повторюваність при серійному виробництві. Після механічної обробки деталі піддаються термічній або хіміко-термічній обробці відповідно до вимог підрозділу 2.8, а потім виконуються фінішні операції шліфування й доведення робочих поверхонь.

Важливим принципом підвищення технологічності є виконання відповідальних базових поверхонь за одне устанавлення. Посадковий пояс корпусу під шпиндель, опорний торець, гнізда майстер-кулачків та опорні кільця обробляються в єдиному циклі, що мінімізує похибки співвісності й перпендикулярності. Аналогічно, базувальні поверхні хвостовиків змінних вкладишів і робочі поверхні для затиску заготовок обробляються у зібраному стані патрона, що дозволяє досягти високої взаємної точності й зменшити додаткові настроювальні операції під час експлуатації.

Процес збирання патрона включає кілька основних етапів. На підготовчій стадії здійснюється очищення деталей від окалини та абразивних частинок, контроль геометричних розмірів, перевірка твердості після термообробки, видалення задирок і притуплення гострих кромek. Далі здійснюється попереднє збирання корпусу з майстер-кулачками та клиновим механізмом із використанням тимчасових баз і кондукторів, що забезпечують точне розташування елементів. Після цього монтуються тяги, шток пневмоциліндра, кришки й ущільнювальні елементи. На завершальній стадії встановлюються змінні вкладиші (верхні кулачки), перевіряється плавність ходу та відсутність заїдань у всіх положеннях.

Контроль якості виробу здійснюється на всіх стадіях виготовлення – від вхідного контролю матеріалів до кінцевих приймальних випробувань. Вхідний контроль включає перевірку сертифікатів на метал, вибіркового аналізу хімічного складу, контроль твердості та макроструктури литих або кованих заготовок. Операційний контроль передбачає вимірювання основних геометричних розмірів (діаметрів, довжин, ширини пазів), параметрів шорсткості, точності

взаємного розташування отворів і пазів. Для цього використовуються штангенінструмент, мікрометри, нутроміри, індикаторні головки, контрольно-вимірювальні машини та пристосування. На стадії фінішної обробки обов'язковими є контроль твердості робочих поверхонь кулачків, клина, напрямних, а також перевірка відсутності перегріву, тріщин і зон відшарування покриттів (візуальний огляд, капілярний контроль за потреби).

Під час комплексного контролю зібраного патрона виконуються статичні та динамічні випробування. Статична перевірка включає вимірювання радіального й торцевого биття контрольної оправки, закріпленої в патроні, на різних діаметрах. Радіальне биття контролюється індикатором годинникового типу на заданому радіусі, торцеве – на опорній торцевій поверхні; отримані значення порівнюються з нормативними (як правило, не більше 0,02–0,03 мм для патронів підвищеної точності). Виконується також перевірка співвісності посадкової поверхні корпусу й внутрішніх базувальних отворів.

Окремим етапом є контроль силових параметрів: патрон установлюється на стенд, у якому вимірюється залежність сили затиску від тиску в пневмосистемі. За допомогою тензометричного кільця або спеціальної вимірювальної оправки фіксується фактичне зусилля на кулачках і порівнюється з розрахунковими значеннями з підрозділів 2.3 і 2.4. Це дозволяє підтвердити правильність роботи силового механізму, оцінити втрати на тертя й перевірити запас міцності за моментом. Герметичність пневмосистеми контролюється шляхом витримки під робочим тиском із реєстрацією падіння тиску в магістралі та візуальним оглядом з'єднань.

Для систематизації основних контрольних операцій доцільно виділити ключові параметри, засоби контролю та критерії приймання (табл. 2.3).

Таблиця 2.3 – Основні параметри контролю якості швидкопереналагоджуваного патрона

Об'єкт контролю	Контрольований параметр	Засіб / метод контролю	Критерій приймання
Корпус патрона	Діаметр посадкового пояса, биття торця	Мікрометр, індикаторна стійка	Відхилення в межах поля допуску; биття $\leq$ 0,01–0,015 мм

Гнізда майстер-кулачків	Ширина пазів, паралельність і співвісність	Штангенінструмент, індикатор, плитка	Відхилення розмірів у допуску, непаралельність мінімальна
Майстер-кулачки та вкладиші	Точність базувальних поверхонь, твердість	Шліфувальні калібри, твердомір	Твердість 58–62 HRC, посадка без заїдань
Клин, повзуни, напрямні	Розміри та шорсткість робочих поверхонь	Мікрометр, профілометр	Ra в межах норм, зношування відсутнє
Тяги, шпильки	Діаметр, прямолінійність, твердість	Мікрометр, твердомір	Відповідність розмірам, твердість 32–38 HRC
Зібраний патрон (статичні випроб.)	Радіальне та торцеве биття контрольної оправки	Індикатор годинникового типу	Радіальне та торцеве биття $\leq 0,02\text{--}0,03$ мм
Силовий привід	Сила затиску при заданому тиску	Вимірювальна оправка, манометр	Сила не менша розрахункової, відхилення в межах $\pm 5\text{--}10\%$
Пневмосистема	Герметичність, відсутність витоків	Витримка під тиском, візуальний огляд	Витоків немає, падіння тиску мінімальне

Завершальним етапом є випробування патрона на робочих обертах із контрольним комплектом заготовок. Перевіряється стабільність затискних зусиль, відсутність самовідкручування кріпильних елементів, нагрів механізму й відсутність аномальних вібрацій. За результатами випробувань оформлюється протокол, на підставі якого патрон допускається до серійного застосування або потребує коригування конструкції чи технології виготовлення.

Отже, забезпечення високої технологічності виготовлення та раціонально організований контроль якості на всіх стадіях життєвого циклу дозволяють гарантувати стабільні експлуатаційні характеристики швидкопереналагоджуваного патрона, зберегти точність, співвісність і надійність роботи в умовах інтенсивної експлуатації на сучасних ЧПК-верстатах.

2.10 Аналіз ризиків і безпеки; міжблокування та типові випробування

Експлуатація швидкопереналагоджуваного затискного патрона на ЧПК-верстатах пов'язана з підвищеними вимогами до безпеки, оскільки від надійності його роботи залежить не лише точність обробки, а й життя та здоров'я обслуговуючого персоналу. Основною небезпекою є втрата затиску заготовки на високих обертах, викид деталі або елементів патрона, раптове падіння тиску в пневмосистемі, а також помилки оператора під час переналагодження. Тому конструкція патрона доповнюється системою технічних і організаційних заходів, що забезпечують керованість ризиків і відповідність вимогам промислової безпеки.

До основних небезпечних ситуацій належать:

- недостатня сила затиску при роботі на високих обертах (втрата заготовки через дію відцентрових сил);
- розкриття патрона або спрацювання механізму розтискання при обертанні шпинделя;
- пневматичні витoki або падіння тиску нижче допустимого рівня під час обробки;
- руйнування кулачків, тяг або кріпильних елементів через перевантаження чи втому;
- неправильне встановлення змінних вкладишів (неповне базування, монтаж «навпаки»);
- перевищення допустимих обертів для заданої конфігурації кулачків і заготовки.

Для керування цими ризиками в конструкцію патрона та системи керування верстата вводяться системи міжблокування й захисту. Електронні та пневматичні міжблокування забезпечують:

- заборону запуску шпинделя, якщо патрон не перебуває в стані

«затиснуто» (сигнал від кінцевого вимикача або датчика положення клина/штока);

- блокування команди на розтиск, якщо шпindel обертається або не досягнута зупинка (сигнал з енкодера/тахогенератора);
- контроль тиску в пневмосистемі— при падінні тиску нижче встановленого порогу верстат автоматично зупиняється, а обробка припиняється;
- обмеження максимальної частоти обертання залежно від типорозміру патрона та вильоту кулачків (апаратні або програмні «м'які» межі в системі ЧПК).

Механічні заходи безпеки включають: застосування конструктивних упорів і стопорів, що не допускають виходу кулачків за граничне положення; виконання всіх кріпильних елементів з достатнім запасом міцності; виключення можливості випадкового від'єднання змінних вкладишів за рахунок самогальмівних з'єднань типу «ластівчин хвіст» з додатковим штифтом та гвинтовою фіксацією.

З точки зору аналізу ризиків доцільно представити основні небезпечні фактори, імовірні причини та передбачені заходи захисту у вигляді таблиці (табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Основні ризики експлуатації патрона та заходи безпеки

Ризик / небезпечний фактор	Можливі причини	Передбачені заходи безпеки та міжблокування
Втрата затиску заготовки на високих обертах	Недостатня сила затиску; падіння тиску; знос кулачків	Розрахунок сили з запасом; контроль тиску датчиком; обмеження обертів; регулярний огляд зносу
Розкриття патрона при обертанні шпинделя	Помилкова команда «розтиск»; відмова пневмоклапана	Міжблокування «заборона розтиску при обертанні»; дублюючі запірні клапани; контроль стану патрона
Руйнування кулачка або тяги	Перевантаження, втома матеріалу, дефекти обробки	Розрахунок на міцність з коефіцієнтом запасу; вибір легованих сталей; НК-контроль відповідальних зон
Неправильне встановлення	Помилка оператора,	Асиметрія базувальних

змінних вкладишів	перевернутий монтаж	елементів; механічні упори; інструкція й маркування; пробне обертання на малих обертах
Витік пневматичної рідини, падіння тиску	Знос ущільнень, пошкодження рукавів	Регламентний огляд; контроль тиску; аварійне вимкнення при падінні тиску нижче порога
Перевищення допустимих обертів	Невірні налаштування програми, помилка оператора	Програмні обмеження N_{max} в ЧПК; попереджувальні написи; прив'язка режимів до типу патрона й вильоту кулачків
Травмування при заміні кулачків / вкладишів	Операції при включеному верстаті; випадковий запуск	Процедура блокування (Lock-out/Tag-out); вимога повної зупинки верстата; зняття тиску в пневмосистемі

Окрім конструктивних заходів, важливу роль відіграють типові випробування патрона, які підтверджують його безпечну роботу в заданих умовах. До основних видів випробувань належать:

- Статичні силові випробування— перевірка здатності патрона забезпечувати розраховану силу затиску без перевищення допустимих напружень у елементах. На стенді вимірюється сила на кулачках при різних значеннях тиску в пневмосистемі, порівнюються фактичні характеристики з розрахунковими.
- Випробування на перевантаження— короткочасне підвищення тиску й сили затиску на 20–30 % вище номінального значення з метою перевірки запасу міцності та відсутності залишкових деформацій.
- Швидкісні (обертові) випробування— робота патрона з контрольними оправками на максимальних допустимих обертах, а також із запасом (наприклад, $1,2-1,3 \cdot N_{ном}$), з контролем вібрацій, нагріву й відсутності ознак втрати затиску.
- Ресурсні випробування— багаторазове повторення циклів затискання/розтискання з імітацією реальних умов обробки (зміна обертів,

подачі, температури), що дозволяє оцінити знос елементів і стабільність силових характеристик у часі.

- Перевірка дії міжблокувань— тестування роботи всіх електронних і пневматичних блокувань: неможливість запуску шпинделя при незатиснутому патроні, автоматичне зупинення верстата при падінні тиску, заборона розтиску при обертанні тощо.

- Пневматичні випробування на герметичність— подача підвищеного тиску в пневмосистему з витримкою протягом певного часу та контролем витоків, падіння тиску та стану ущільнень.

Результати випробувань оформлюються у вигляді протоколів, у яких фіксуються всі параметри: досягнуті сили затиску, максимальні оберти, значення биття, показники герметичності та працездатності міжблокувань. Лише після позитивного проходження зазначених випробувань патрон може бути допущений до серійного застосування й експлуатації на виробництві.

Побудований аналіз ризиків, реалізована система конструктивних, пневматичних та електронних міжблокувань, а також проведення типових випробувань дозволяють забезпечити необхідний рівень безпеки при роботі швидкопереналагоджуваного патрона. Це гарантує, що навіть у разі відмов окремих елементів або помилок персоналу ймовірність аварійних ситуацій буде мінімальною, а наслідки – контрольованими.

3 СПОСОБИ ПОКРАЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШВИДКОПЕРЕНАЛАГОДЖУВАНОВОГО ПАТРОНА

3.1 Зменшення часу переналагодження (SMED) та ергономіка змінного оснащення

Ефективність роботи токарного верстата з ЧПК значною мірою визначається не стільки паспортною потужністю чи максимальною частотою обертання шпинделя, скільки втратами часу на переналагодження. У типових виробничих умовах значна частка змінного фонду витрачається на заміну заготовки, перестановку кулачків, пошук базування та контроль положення деталі. Для зменшення цих втрат у сучасній практиці використовують підхід SMED (Single Minute Exchange of Die), який базується на розмежуванні внутрішніх операцій (що виконуються при зупиненому верстаті) та зовнішніх (які можна виконувати паралельно з основною обробкою), а також на стандартизації послідовності дій і застосуванні швидкодіючого оснащення.

При аналізі існуючих конструкцій затискних пристроїв можна виділити низку рішень, що орієнтовані на швидкий і зручний затиск заготовки. Характерним прикладом є цанговий патрон із маховичком, показаний на рисунку 3.1. Обертання маховичка забезпечує одночасне радіальне стискання цанги, завдяки чому оператор виконує затиск за один–два рухи без перестановки окремих кулачків. Подібні рішення добре вписуються в ідеологію SMED, оскільки мінімізують кількість внутрішніх операцій і дозволяють виконувати частину підготовчих дій (очищення, перевірку цанги, підготовку наступної деталі) як зовнішні.

Ще одним прикладом швидкодіючого й ергономічного елемента є самозатискний хомутик (рис. 3.2), у якому передача зусилля затиску здійснюється за рахунок клинового механізму з самогальмуванням. Оператору достатньо один раз перевести важіль у робоче положення, після чого контактні поверхні хомутика забезпечують необхідне притискання без додаткового підкручування гайок чи гвинтів. Подібні вузли можуть використовуватися як

елементи швидкозмінного оснащення в складі патрона або допоміжних пристроїв для базування заготовок складної форми.

У вихідному (прототипному) варіанті універсального трикулачкового патрона послідовність дій оператора під час переходу на інший діапазон діаметрів містить: зупинку верстата, відкриття огорожі, поетапне відгвинчування гвинтів кріплення м'яких кулачків, їх зняття, установлення іншого комплекту, попереднє центрування та контроль положення заготовки. Усі ці операції належать до внутрішніх, виконуються при зупиненому шпинделі й потребують значних ручних зусиль. Структуру й орієнтовну тривалість операцій доцільно подати у таблиці 3.1, де для кожного кроку зазначають назву, час виконання та належність до внутрішніх чи зовнішніх.

У модернізованій конструкції швидкопереналагоджуваного патрона пропонується використання касет зі швидкозмінними кулачками, які можуть бути попередньо налаштовані на потрібний діаметр поза верстатом. Переналагодження зводиться до зупинки шпинделя, розблокування замків, зняття касети та встановлення попередньо підготовленої касети з іншим комплектом кулачків. Попереднє базування й перевірка касет виконуються як зовнішні операції, паралельно роботі верстата. У результаті внутрішній цикл фактично складається лише з двох–трьох коротких дій: заміна касети, пробний затиск, контроль положення.

Сумарний час переналагодження до модернізації можна представити як

$$T_0 = \sum_{i=1}^n t_i, \quad (3.1)$$

де t_i – тривалість i -ї операції внутрішнього циклу, n – їх кількість. Після впровадження швидкозмінного оснащення внутрішній час становитиме

$$T_1 = \sum_{j=1}^m t_j, \quad (3.2)$$

де $m < n$, а частину операцій перенесено до розряду зовнішніх. Відносне зменшення часу переналагодження визначається як

$$\Delta T = \frac{T - T_1}{T} \cdot 100\%, \quad (3.3)$$

Отримане значення дозволяє оцінити приріст завантаження верстата та

потенційне збільшення випуску деталей за зміну без додаткових капіталовкладень. За рахунок скорочення внутрішнього часу переналагодження зменшуються простой обладнання, підвищується коефіцієнт змінного використання та ефективність роботи ділянки в цілому.

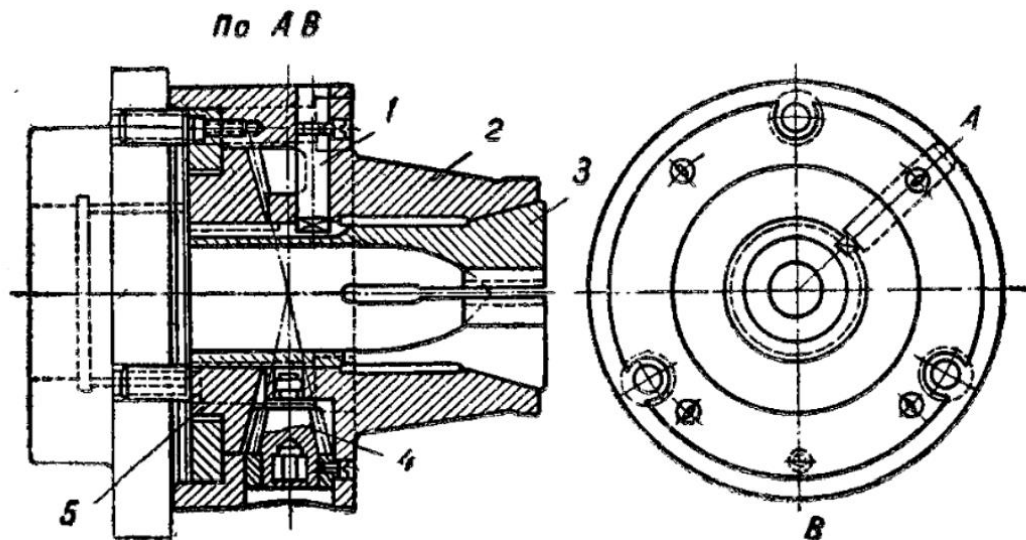


Рисунок 3.1 – Цанговий патрон із маховичком

Окрему увагу в конструкції швидкопереналагоджуваного патрона приділяють ергономіці робочого місця оператора. Використання вузлів, подібних до цангового патрона з маховичком (рис. 3.1), дає змогу виконувати затиск заготовки за один–два рухи, зменшує необхідні ручні зусилля та скорочує амплітуду рухів. Зони захвату й органи керування у таких пристроях розташовують з урахуванням антропометричних розмірів руки та безпечного віддалення від зони обертання патрона.

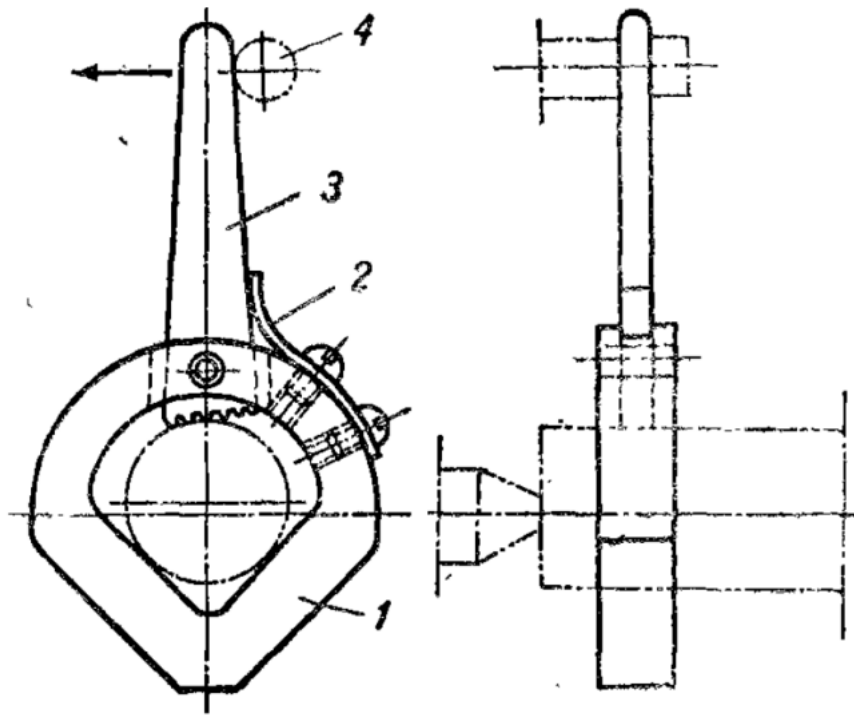


Рисунок 3.2 – Самозатискний хомутик

Самозатискні хомутики (рис. 3.2) є прикладом механізмів, у яких завдяки клиновим і важільним парам забезпечується автоматичне наростання зусилля затиску при навантаженні, що також відповідає вимогам швидкого й надійного фіксування заготовки. Застосування подібних елементів у складі швидкозмінного оснащення дозволяє знизити стомлюваність оператора, зменшити ймовірність помилок під час затиску та, в кінцевому підсумку, додатково скоротити середній час переналагодження за рахунок більш стабільної й повторюваної послідовності дій.

3.2 Оптимізація профілю кулачків і контактної плями; компенсація деформацій

У стандартних рейкових трикулачкових самоцентруючих патронах (рис. 3.3) переважають прямі, ступінчасті або призматичні кулачки з відносно вузькою контактною ділянкою. За такого виконання фактична зона дотику кулачка із заготовкою наближається до лінійної або навіть точкової, що призводить до зростання локальних напружень, вминання матеріалу, появи овальності й

збільшення радіального биття, особливо під час затиску тонкостінних кілець і гільз. У результаті погіршується точність обробки й стабільність базування.

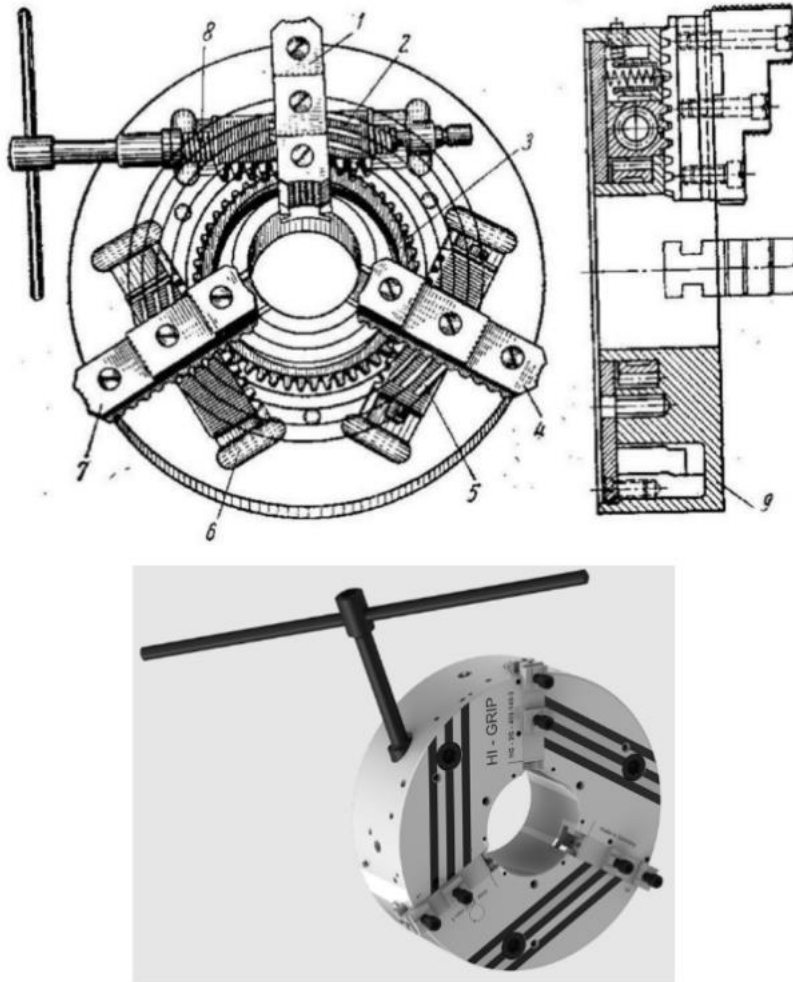


Рисунок 3.3 – Рейковий трикулачковий самоцентруючий патрон

Запропонований варіант профілю кулачків орієнтований на розширення й стабілізацію контактної плями. Робочі поверхні виконуються з раціональними радіусами заокруглення, узгодженими з діапазоном діаметрів затиску, а довжина контактної ділянки в осьовому напрямку збільшується. За потреби застосовуються накладні м'які вставки, які підганяються під геометрію конкретної деталі й рівномірніше розподіляють зусилля по поверхні. Подібний підхід реалізовано в мембранних патронах (рис.3.4), де затиск здійснюється через еластичний елемент, що сприймає навантаження не в окремих точках, а по замкненому контуру. Це дозволяє суттєво зменшити максимум контактних

напружень і ризик пошкодження робочої поверхні заготовки.

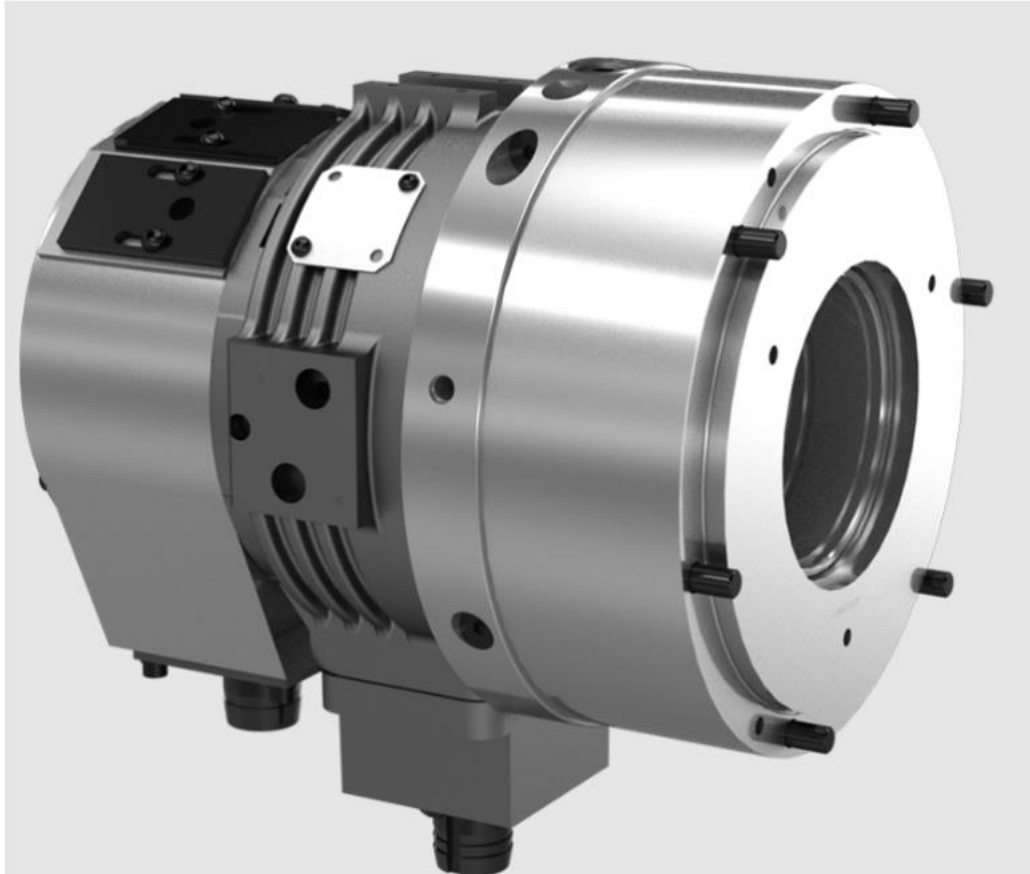


Рисунок 3.4 – Загальний вигляд мембранного патрона

Порівняння умов роботи «до» та «після» оптимізації профілю доцільно виконати на основі оцінки зусиль затиску й площі фактичної контактної зони. У вихідному варіанті при тій самій силі затиску контактна пляма є значно меншою, тому тиск у зоні дотику вищий. Після введення радіусів заокруглення, збільшення довжини опорної поверхні та застосування м'яких вставок площа контакту зростає, тиск розподіляється рівномірніше, а локальні пікові значення зменшуються. Узагальнені результати порівняння можна подати в таблиці 3.2, де для базового й модернізованого варіантів наводяться зусилля затиску, орієнтовна площа контакту та якісна оцінка рівня напруженого стану.

Важливим фактором є і пружні деформації заготовки та елементів патрона. При затиску тонкостінних деталей три радіальні сили від кулачків викликають розтискання кільця, спотворення форми та формування еліптичного поперечного перерізу. У спеціалізованих мембранних патронах (рис. 3.5) компенсація деформацій досягається за рахунок керованої пружної деформації мембрани, яка

рівномірно підтискає деталь по всьому колу, зменшуючи овальність і радіальне биття після розтиску. Розроблюваний швидкопереналагоджуваний патрон орієнтується на цей принцип: оптимізований профіль кулачків і збільшена контактна пляма дозволяють знизити деформацію тонкостінних заготовок, підвищити стабільність базування та забезпечити точність обробки при збереженні можливості швидкої зміни оснащення.

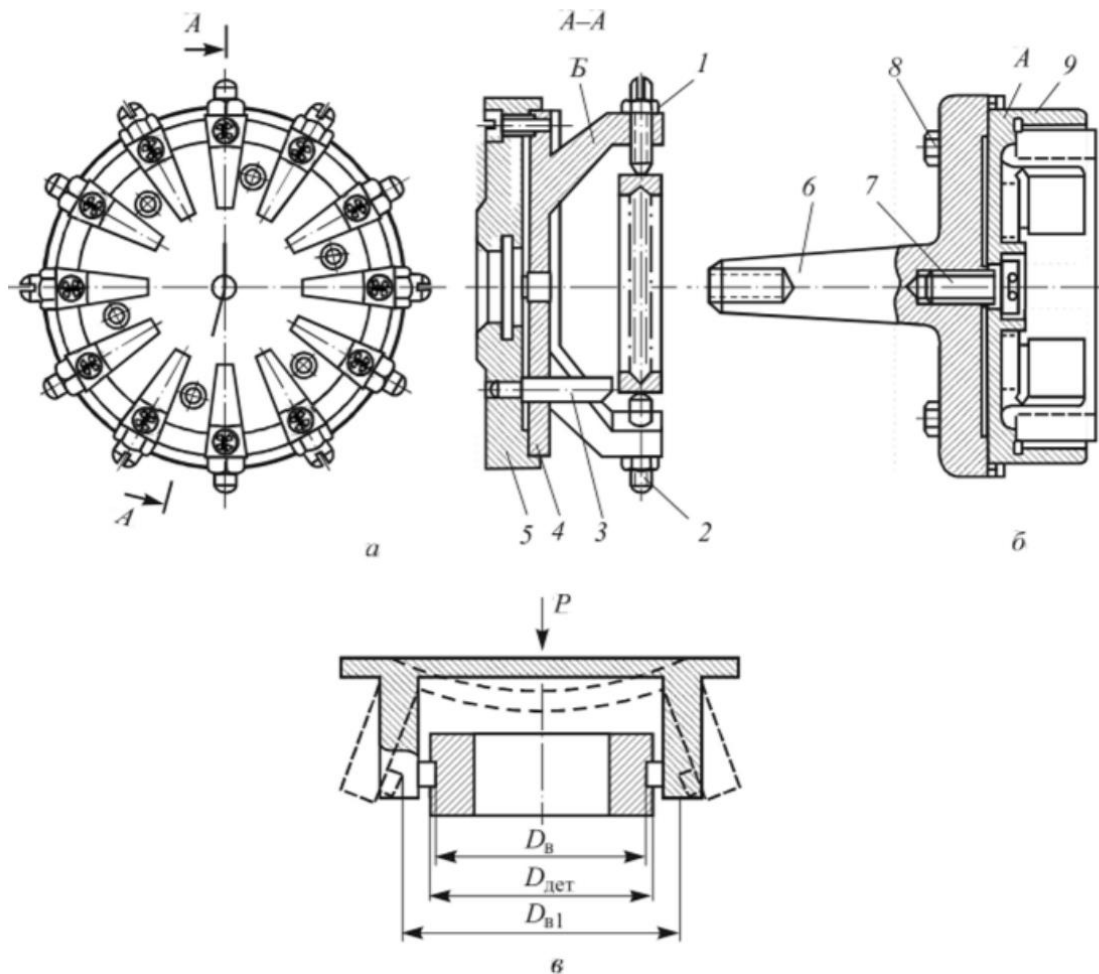


Рисунок 3.5 – Схема мембранного патрона для внутрішньошліфувальних верстатів

Подібні конструкції демонструють підхід, коли компенсація деформацій закладена безпосередньо в геометрію й пружні властивості затискного елемента, а не перекладається на оператора або додаткові налаштування верстата. Для розроблюваного швидкопереналагоджуваного патрона це означає, що профіль кулачків і характер контакту з деталлю слід проектувати так, щоб основна частина навантаження сприймалася не окремими жорсткими вершинами, а

розподілялася по максимально можливій довжині опорної поверхні. Використання м'яких накладних вставок, раціональних радіусів заокруглення та збільшеної контактної плями дозволяє реалізувати «м'який» затиск, близький за ефектом до мембранного, але без ускладнення конструкції патрона.

У підсумку оптимізація профілю кулачків і контактної плями забезпечує подвійний ефект: з одного боку, зменшуються контактні напруження та ймовірність пошкодження або спотворення форми тонкостінних заготовок; з іншого – підвищується відтворюваність базування, зменшується радіальне биття та покращується якість обробленої поверхні. Це створює необхідні передумови для того, щоб швидкопереналагоджуваний патрон був не лише зручним у роботі, а й конкурентоспроможним за точністю та надійністю затиску порівняно з традиційними універсальними й спеціалізованими патронами.

3.3 Балансування, приглушення вібрацій і робота на високих обертах

Робота патрона на підвищених частотах обертання пред'являє підвищені вимоги до його балансування та жорсткості. Навіть незначний дисбаланс викликає зростання відцентрових сил, що діють на корпус, кулачки та вузол кріплення до шпинделя. Це призводить до появи підвищених вібрацій, зниження точності обробки, підвищення шуму та прискореного зносу підшипників шпиндельного вузла. Для силових патронів, що працюють у важких режимах, питання балансування є також фактором безпеки: при великих швидкостях обертання неврівноважені маси можуть стати причиною руйнування елементів патрона або заготовки.

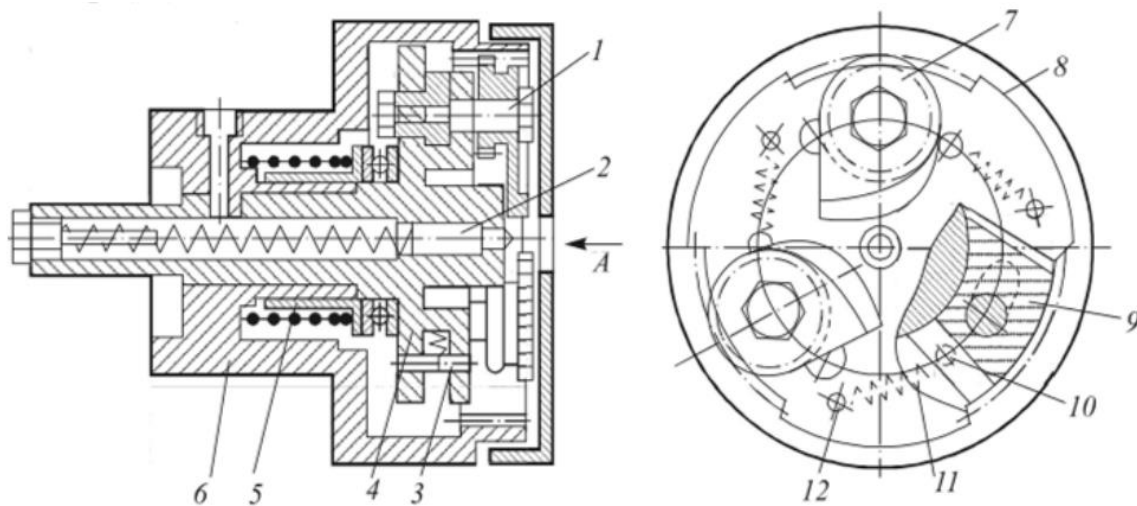


Рисунок 3.6 – Повідковий самозатискний трикулачковий патрон

Повідкові самозатискні трикулачкові патрони (рис.3.6) демонструють ряд конструктивних рішень, спрямованих на роботу в навантажених режимах: компактні масивні корпуси, симетричне розміщення кулачків, мінімізовані виноси мас відносно осі обертання. Завдяки цьому вдається зменшити дисбаланс та забезпечити більш рівномірний розподіл навантаження по колу. При проектуванні швидкопереналагоджуваного патрона доцільно орієнтуватися на подібні принципи: забезпечити максимально можливу симетрію розташування каналів, порожнин і кріплень, уникати «важких» елементів, зосереджених лише в одній зоні. Додатково застосовують компенсувальні отвори та вибірки матеріалу в місцях надлишкової маси, що дозволяє виконати статичне й динамічне балансування патрона з урахуванням маси кулачків і касет.

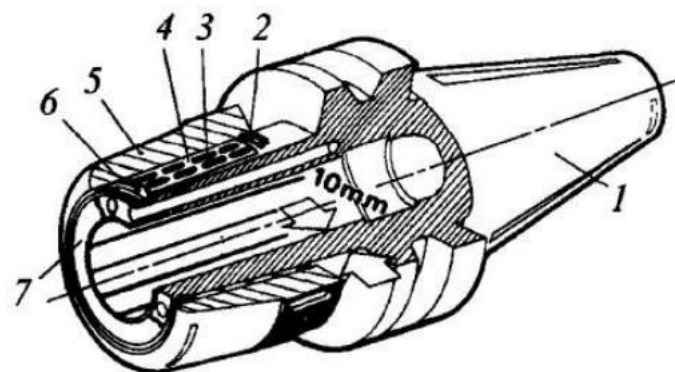


Рисунок 3.7 – Роликовий патрон

Роликові патрони (рис. 3.7) є прикладом спеціалізованих пристроїв, орієнтованих на стабільну роботу на високих обертах. Тут поєднано підвищену

жорсткість силового ланцюга, зменшені зазори в рухомих з'єднаннях та наявність елементів, що виконують роль демпфера вібрацій. За рахунок раціонального розподілу мас і зменшення амплітуди коливань досягається більш плавний хід, зниження динамічних навантажень на шпиндель та покращення якості обробленої поверхні. Для розроблюваного швидкопереналагоджуваного патрона важливо закласти аналогічні підходи: мінімізувати масу рухомих частин кулачкових касет, передбачити можливість їх зняття та заміни без порушення балансування, застосувати конструктивні елементи, що частково гаситимуть вібрації (належне мастило, щільні посадки, раціональна форма корпусу).

Оцінка ефективності проведеного балансування може виконуватися на основі вимірювання вібраційної швидкості або переміщення в процесі розгону верстата до робочих обертів. Характерний вигляд такої залежності має показувати суттєве зменшення амплітуди коливань після виконання балансувальних робіт, особливо в зоні номінальної частоти обертання. Для модернізованого патрона очікується не лише зниження рівня вібрацій, а й стабільніша поведінка при переході через резонансні ділянки, що в комплексі підвищує ресурс шпиндельного вузла, покращує умови праці оператора та забезпечує можливість безпечної й точної роботи на високих обертах.

3.4 Вплив мастильних матеріалів та герметизації на ресурс і точність

У конструкції швидкопереналагоджуваного патрона окремо виділяються ті вузли, від стану яких безпосередньо залежать ресурс і стабільність затиску: напрямні поверхні кулачків, елементи приводу затиску, зони ущільнень, опорні та центрувальні поверхні, а також шарнірні елементи швидкозмінного оснащення. Для кожного з них задаються рекомендований тип мастила та інтервал обслуговування, щоб у реальній експлуатації уникати роботи «на суху», заїдань і швидкого зростання люфтів. Узагальнити ці рішення доцільно у вигляді зведеної таблиці.

Таблиця 3.3 – Рекомендовані мастильні матеріали та інтервали обслуговування

вузлів патрона

Вузол патрона	Тип мастила	Інтервал обслуговування	Орієнтовний ресурс до ревізії
Напрямні кулачків у корпусі	Пластичне мастило для важких умов	Перезмазування орієнтовно раз на 250–300 год роботи	3–5 років за умови регулярного ТО
Поршень і шток пневмоциліндра	Індустріальне пневматичне масло	Заміна й контроль разом із пневмосистемою верстата	5 років і більше
Ущільнення штока та підвідних каналів	Сумісне з робочою рідиною мастило або тонкий шар консистентного складу	Огляд при кожному плановому ТО, заміна за потреби	До помітної втрати еластичності
Опорні та центрувальні поверхні	Тонкий шар пластичного мастила	Оновлення під час розбирання й ревізії патрона	Не рідше одного разу на 3–4 роки
Шарнірні й поворотні елементи швидкозмінного оснащення	Пластичне мастило універсального типу	За результатами візуального огляду, не рідше одного разу на рік	До появи відчутного люфту або слідів зносу

Наявність такої таблиці фактично формує для патрона «карту змащування» і дає змогу прямо в пояснювальній записці показати, що питання ресурсу й точності не залишені на рівні загальних міркувань. Обслуговуючий персонал отримує чіткі орієнтири: які точки потребують уваги, яким саме мастилом їх опрацьовувати й через який проміжок часу це робити. У підсумку це дозволяє довше зберігати початкові значення зусилля затиску, радіального й осьового биття, знизити кількість відмов, пов'язаних із заїданням механізму, та забезпечити стабільну роботу швидкопереналагоджуваного патрона в реальних виробничих умовах.

3.5 Моніторинг стану (датчики тиску/ходу), діагностика та ППР

У конструкції швидкопереналагоджуваного патрона доцільно передбачити можливість моніторингу його стану в реальному часі, що відповідає сучасним вимогам інтеграції з системами ЧПК і підвищення надійності технологічного обладнання. Насамперед важливими контрольованими параметрами є тиск у

пневмолінії приводу затиску, хід поршня пневмоциліндра або фактичне переміщення кулачків, а також рівень вібрацій чи биття в зоні патрона. Контроль тиску дозволяє судити про наявність необхідного зусилля затиску, контроль ходу – про коректне положення кулачків (стан «затиснуто» / «розтиснуто»), а аналіз вібрацій дає змогу виявити порушення балансування, люфти або дефекти в елементах патрона та шпиндельного вузла.

Схема встановлення датчиків у такому патроні може бути реалізована наступним чином. У пневмолінії, що підводиться до пневмоциліндра приводу затиску, монтується датчик тиску, який реєструє фактичне значення тиску під час затиску й дає сигнал у систему ЧПК при його падінні нижче встановленого порога. На кришці пневмоциліндра або в зоні кінцевого положення поршня встановлюють датчик положення (індуктивний, магнітний або кінцевий вимикач), який підтверджує досягнення робочого положення «затиснуто» або «розтиснуто». За потреби біля корпусу патрона або на станині біля шпинделя може бути розміщений датчик вібрацій, що оцінює рівень коливань у діапазоні робочих частот. Сигнали від усіх датчиків через стандартні входи надходять до ПЛК або безпосередньо в систему ЧПК, де обробляються програмно й використовуються як умови для продовження або блокування циклу.

Алгоритм діагностики роботи патрона вбудовується в керуючу програму верстата. Після подачі команди на затиск система контролює, чи досягнуто заданого тиску в пневмолінії за обмежений проміжок часу й чи спрацював датчик положення, що фіксує стан «затиснуто». Якщо тиск не досягає порогового значення або кінцевий вимикач не спрацьовує, система формує аварійне повідомлення, блокує запуск шпинделя та подальший рух інструмента, виводячи на екран оператора відповідний код помилки. Аналогічно при розтиску контролюється повернення поршня й кулачків у вихідне положення; у разі невиходу патрона в стан «розтиснуто» система не дозволяє почати наступний цикл. Дані датчика вібрацій можуть використовуватися як індикатор небажаних змін стану вузла: перевищення встановленого рівня коливань слугує приводом для зупинки верстата й проведення позачергового огляду.

Для забезпечення довготривалої безвідмовної роботи системи моніторингу та власне патрона формуються заходи планово-попереджувальних робіт. Вони включають періодичний візуальний огляд стану кабелів і роз'ємів датчиків, перевірку чутливості й спрацювання кінцевих вимикачів, контроль показів датчика тиску при відомих опорних режимах, ревізію ущільнень і з'єднань пневмосистеми, очищення патрона від забруднень. Зручним є представлення цих робіт у вигляді таблиці з вказанням періодичності й відповідальних осіб.

Таблиця 3.4 – Заходи моніторингу та планово-попереджувальних робіт для патрона

Операція	Періодичність	Відповідальний
Перевірка показів датчика тиску в пневмолінії на опорному режимі	Не рідше одного разу на місяць	Налаштувальник, майстер
Контроль спрацювання датчиків положення («затиснуто» / «розтиснуто»)	Під час кожного планового ТО верстата	Слюсар з ремонту
Огляд кабелів, роз'ємів і кріплень датчиків, очищення від забруднень	Один раз на 3 місяці або за потреби	Електромонтер, слюсар
Огляд ущільнень пневмопривода, перевірка наявності витікань	Під час планового ТО, не рідше одного разу на пів року	Слюсар з ремонту
Перевірка рівня вібрацій у робочому діапазоні обертів	Один раз на пів року або після балансування	Інженер-технолог, налагоджувальник
Ревізія датчиків (заміна у разі відмови або втрати чутливості)	За результатами діагностики, але не рідше одного разу на 3–5 років	Служба головного механіка

Наявність такої системи моніторингу й формалізованого регламенту ППР робить швидкопереналагоджуваний патрон елементом «розумного» верстата. Оператор отримує однозначні сигнали про стан затиску й можливі відхилення, а керуюча система в разі несправності не допускає початку потенційно небезпечних режимів. Це дозволяє знизити ризик аварій, пов'язаних із недостатнім зусиллям затиску або відмовою приводу, своєчасно виявляти тенденції до погіршення стану вузлів і планувати ремонти, не чекаючи раптових відмов у процесі обробки. У підсумку інтеграція датчиків і продумана система діагностики підвищують загальну надійність патрона та відповідають сучасним вимогам до обладнання, що працює в автоматизованих виробничих лініях.

3.6 Порівняння з прототипом і верифікація на стендових та виробничих випробуваннях

Для оцінки ефективності запропонованого швидкопереналагоджуваного патрона як прототип розглянуто типовий універсальний рейковий трикулачковий самоцентруючий патрон того самого діаметра, що широко застосовується на токарних верстатах з ЧПК. Такий патрон забезпечує достатньо широкий діапазон діаметрів затиску і прийнятну точність у стандартних режимах, однак не має швидкозмінного оснащення, працює без вбудованих датчиків стану й орієнтований на відносно рідкі переналагодження. Заміна кулачків виконується вручну, послідовність операцій затягування та вивірки залежить від кваліфікації оператора, а контроль зусилля затиску та стану приводу здійснюється опосередковано.

Запропонований швидкопереналагоджуваний патрон зберігає габаритно-приєднувальні розміри, сумісний з верстатом, але має іншу конструкцію приводу і робочих органів. У ньому реалізовано використання касет зі швидкозмінними кулачками, пневматичний привід затиску з можливістю контролю тиску, оптимізований профіль кулачків для зменшення деформацій заготовки, а також передбачено інтеграцію датчиків стану в систему ЧПК. Це дає змогу скоротити час переналагодження, підвищити точність базування та забезпечити автоматизований моніторинг критичних параметрів. Узагальнене порівняння основних характеристик прототипу та розробленого патрона наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Порівняння основних параметрів прототипу та швидкопереналагоджуваного патрона

Параметр	Прототип (універсальний патрон)	Швидкопереналагоджуваний патрон	Коментар
Час переналагодження (заміна кулачків, перехід на інший діапазон), хв	Близько 5–7, з ручною перестановкою кулачків	Близько 2–3, завдяки касетам швидкозмінних кулачків	Скорочення часу за рахунок винесення частини операцій назовні та стандартизації дій

Максимальна частота обертання, об/хв	Обмежена з міркувань вібрацій та дисбалансу	Підвищена завдяки поліпшеному балансуванню та зменшеній масі рухомих частин	Можливість стабільної роботи на вищих обертах
Радіальне/осьове биття на діаметрі базування	На рівні стандартних допусків для універсальних патронів	Зменшене за рахунок оптимізованого профілю кулачків і поліпшених посадок	Покращення точності й повторюваності базування
Діапазон діаметрів затиску	Стандартний для патрона відповідного типорозміру	Не менший, передбачено окремі касети під типові діапазони	Збереження сумісності з номенклатурою заготовок
Маса й габарити	Базові для даного типорозміру	Порівнянні, локальне зменшення маси рухомих елементів	Не потребує змін у компоновці верстата
Наявність датчиків тиску/положення	Відсутні, контроль непрямої	Передбачені датчики тиску та положення поршня/кулачків	Можливість інтеграції в систему ЧПК і автоматизованого контролю
Можливість моніторингу вібрацій	Не реалізована на рівні патрона	Передбачена установка датчика вібрацій	Рання діагностика порушення балансування та зносу
Характер затиску тонкостінних деталей	Жорсткий, із помітними деформаціями	Більш «м'який» завдяки збільшеній контактній плямі та оптимізованому профілю	Зменшення овальності та ризику пошкодження заготовки

Порівняльна верифікація характеристик проводиться на основі стендових і умовно виробничих випробувань. Для цього патрони по черзі встановлюються на шпиндель випробувального стенда або безпосередньо на верстат, де здійснюється вимірювання часу переналагодження при переході між типорозмірами заготовок, оцінка радіального й осьового биття за допомогою індикаторів годинникового типу, контроль зусилля затиску через вбудовані чи зовнішні датчики, а також реєстрація рівня вібрацій на характерних режимах обертання. У випадку прототипу всі вимірювання виконуються з використанням штатної для підприємства технології затиску, тоді як для розробленого патрона застосовуються касети швидкозмінних кулачків і схема моніторингу стану, описана в попередньому підрозділі.

Якщо фактичні експериментальні дані відсутні, порівняння проводиться на

основі розрахунково-аналітичних оцінок, отриманих у розділі 2, а також каталожних даних виробників стандартних патронів. У такому випадку час переналагодження оцінюється за кількістю операцій і їх орієнтовною тривалістю, максимально допустима частота обертання – за рекомендаціями щодо роботи з дисбалансом та масою патрона, а точність затиску – за розрахунковими значеннями деформацій і контактних напружень. Для швидкопереналагоджуваного патрона додатково враховується вплив оптимізованого профілю кулачків, поліпшеного балансування та наявності системи моніторингу.

Завдяки застосуванню швидкозмінного оснащення та раціональному розподілу операцій за принципами SMED час переналагодження скорочується орієнтовно у два–два з половиною рази, що прямо підвищує змінну продуктивність верстата. Оптимізація профілю кулачків і поліпшення умов контакту із заготовкою забезпечують зменшення деформацій тонкостінних деталей і зниження радіального биття, а реалізований комплекс заходів з балансування дає можливість упевнено працювати на вищих обертах без надмірних вібрацій. Наявність датчиків тиску й положення дозволяє інтегрувати патрон у систему ЧПК, автоматизувати контроль стану затиску та своєчасно виявляти відхилення від нормальної роботи. У сукупності це свідчить про те, що розроблений швидкопереналагоджуваний патрон має кращі експлуатаційні характеристики порівняно з прототипом і є більш придатним для використання в умовах інтенсивного серійного та масового виробництва.

3.7 Економічна ефективність: собівартість, окупність, ефект від упровадження

Економічну доцільність упровадження швидкопереналагоджуваного патрона оцінюємо за рахунок скорочення втрат часу на переналагодження верстатів і відповідного зростання ефективного фонду роботи обладнання. Для

розрахунків приймаємо такі вихідні дані: вартість одного патрона, кількість верстатів, на які він встановлюється, скорочення часу переналагодження порівняно з прототипом, кількість переналагоджень за зміну, річна кількість змін роботи та вартість однієї машино-години. Узагальнені вихідні параметри наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності впровадження патрона

Показник	Одиниця вимірювання	Значення
Вартість одного швидкопереналагоджуваного патрона	грн	40 000
Кількість верстатів, на які встановлюється патрон	од.	4
Загальні капітальні вкладення у впровадження	грн	160 000
Час переналагодження до впровадження	хв/переналагодження	6
Час переналагодження після впровадження	хв/переналагодження	3
Кількість переналагоджень за зміну	раз/зміну	8
Кількість змін роботи верстата за рік	змін/рік	250
Вартість однієї машино-години роботи верстата	грн/год	600

За наведеними даними економія часу на одному переналагодженні становить 3 хвилини. За зміну при восьми переналагодженнях це дає 24 хвилини, тобто 0,4 год на один верстат. За рік один верстат економить $0,4 \text{ год} \times 250 \text{ змін} = 100 \text{ год}$ машинного часу. Для чотирьох верстатів загальна річна економія становить 400 год/рік. Переводячи цю економію часу в грошовий вираз, множимо 400 год на вартість однієї машино-години (600 грн/год) і одержуємо річний економічний ефект близько 240 000 грн.

Строк окупності капітальних вкладень визначається як відношення загальної вартості патронів (160 000 грн) до річного економічного ефекту (240 000 грн). У нашому прикладі це приблизно 0,7 року, тобто орієнтовно 8 місяців. Основні результати розрахунків подано в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Результати розрахунку економічної ефективності впровадження патрона

Показник	Значення	Одиниця вимірювання
Річна економія машинного часу	400	год/рік

Річний економічний ефект	240 000	грн/рік
Загальні капітальні вкладення у впровадження	160 000	грн
Строк окупності капітальних вкладень	$\approx 0,7$	року (≈ 8 місяців)
Орієнтовне підвищення продуктивності	≈ 5	%

З урахуванням того, що один верстат працює близько 2000 год на рік, сукупний річний фонд часу чотирьох верстатів становить орієнтовно 8000 год. Економія 400 год відповідає збільшенню ефективного фонду приблизно на 5 %, що може бути використано як для додаткового випуску деталей, так і для зниження завантаженості обладнання без погіршення виробничої програми.

Отже, впровадження швидкопереналагоджуваних патронів забезпечує річну економію машинного часу на рівні 400 год і грошовий ефект близько 240 тис. грн за рахунок скорочення втрат на переналагодження. При загальних капітальних вкладеннях 160 тис. грн строк окупності не перевищує 8 місяців, після чого економічний ефект повністю формує чисту економію підприємства. Додатково зростає змінна продуктивність ділянки орієнтовно на 5 %, що дозволяє або збільшити випуск продукції на існуючому парку обладнання, або знизити собівартість обробки заготовок за рахунок кращого використання машинного часу.

4. ПРОЕКТУВАННЯ ЗАТИСКНОГО ПРИСТРОЮ ДЛЯ ВЕРСТАТІВ З ЧПК

4.1. Технологічний аналіз деталі та операції механічної обробки

Пристрій проектується для обробки деталі "Валик", параметри якого наведені на кресленні ДП.МК21.09.000.00. Операцією, для якої проектується пристрій є фрезерування шпонкового пазу на циліндричній поверхні $\varnothing 80h6$, розміри якого дорівнюють: ширина $B=22$ мм, глибина $h=9$ мм, довжина $l=80$ мм. Відстань від початку пазу до правого торцю вала дорівнює $44_{-0.62}$ мм. Поверхня, на який фрезерується шпонковий паз є остаточно обробленою (прошліфованою) з шорсткістю $Ra\ 3.2$. Взагалі, вал є повністю оброблений і операція фрезерування шпонкового пазу є останньою у технологічному процесі її виготовлення.

Шпонковий паз є закритим з обох сторін у напрямі осі деталі. Фрезерування його повинно виконуватись з двома напрямками переміщення (подачі) пристосування з встановленою заготівлею.

Процес обробки деталі на верстаті повинен і буде складатися з наступних етапів:

1) Спочатку стіл верстата з пристосуванням і заготівлею встановлюється у крапку початку шпонкового пазу (на відстань $46+11 = 57$ мм від правого торцю заготівлі);

2) Потім стіл верстата зі заготівлею переміщується у верх до торкання фрези до поверхні заготівлі (підвід заготівлі до торкання фрези);

3) На робочій вертикальній подачі стола із заготівлею виконується врізання фрези на глибину шпонкового пазу;

4) Вертикальна подача виключається, а включається горизонтальна (продовжна) подача у напрямі, паралельному осі заготівлі, і виконується фрезерування шпонкового пазу. При цьому стіл буде переміщуватись на відстань $80 - 22 = 58$ мм (довжина пазу по кресленню деталі мінус діаметр

фрези);

5) По закінченні фрезерування подача виключається і стіл із заготівлею переміщується назад у продовжному і вертикальному напрямках в вихідне положення.

4.2. Огляд конструкцій типових пристроїв для обробки даного типу деталей

Типовими пристроями для фрезерування пазів, лисок на деталях циліндричної форми є лещата з призмами і різними механізмами затиску

Машинні лещата ставляться до групи універсальних пристосувань, що допускають переналагодження. Корпус із полозками й механізм затиску лещат - постійні. Налагодження складається зі змінних губок і інших настановних елементів, проєктованих і виготовляються згідно з формою й розмірами оброблюваних деталей.

Лещата можна розділити на наступні групи.

I. По загальній конструкції: 1) з одною рухливою губкою; 2) самоцентруючі із двома рухливими губками, 3) із плаваючими губками; 4) з губками, що переміщаються взаємно перпендикулярно,

II. По конструкції механізму затиску: 1) гвинтові; 2) ексцентрикові; 3) ексцентрикові з важільним підсилювачем.

III. По типі силового привода: 1) з ручним приводом; 2) пневматичні;

3) механо пневматичні; пневмо пневматичні; 5) пневматичні, 6) пружинні з автоматизованим затискачем від стола верстата, що переміщається.

IV. По напрямку зусилля, прикладеного до рухливої губки: 1) з тягнучим зусиллям (полозок рухливої губки працюють на розтягання); 2) із зусиллям, що штовхає (полозок рухливої губки працюють на стиск).

Крім того, лещата бувають: 1) неповоротні; 2) поворотні в одній площині; 3) поворотні у двох взаємно перпендикулярних площинах.

Відповідно до ДСТ 1490-69 верстатні лещата повинні виготовлятися трьох

типів.

Тип А - з ручним приводом: виконання 1 - неповоротні; виконання 2 - поворотні; виконання 3 - поворотні із двостороннім затиском і посиленням кріпленням.

Тип Б - з пневмоприводом: виконання 1 - неповоротні; виконання 2 - поворотні; виконання 3 - поворотні з посиленням кріпленням.

Тип В - із пневмоприводом: виконання 1 - неповоротні; виконання: 2 - поворотні, виконання 3 - поворотні з посиленням кріпленням.

Сучасні конструкції лещат виконуються швидкодіючими, потужними, жорсткими й у той же час компактними. У ряді конструкцій для установки змінних елементів на корпусі й полозках лещат, крім губок передбачається сітка взаємно паралельних і перпендикулярних Т-образних пазів.

Розглядаємо лещата тільки з ручним приводом і призматичними губками для встановлення циліндричних деталей.

Звичайні гвинтові лещата широко відомі. Нормалізовано розміри й конструкції верстатних гвинтових лещат, що самоцентрують, із призматичними губками для круглих профілів (МН 5791-65) і гвинтових важільних лещат, що самоцентрують, для круглих профілів (МН 5790-65).

ДСТ 14904-69 установлює для лещат з ручним приводом (типу А) основні розміри, наведені в табл. VIII.1 та на рис. VIII.1 [1, с. 530-532]. Але ці лещата не мають призматичних губок.

Матеріал елементів цих лещат та технічні вимоги до них згідно з ДСТ 16518-70. Встановлені нормальний (Н) та підвищений (П) класи точності лещат [1, табл. VIII.2, с. 531]).

4.3. Вибір схеми базування деталі і установчих елементів пристрою

Для виконання операції фрезерування шпонкового пазу заготівля встановлюється на дві призми, що є подвійними напрямними базами й позбавляють заготівлю чотирьох ступенів рухливості (дві лінійні, дві кутові).

Опір деталі лівим торцем до упору в пристрої є опорною базою й позбавляє заготівлю одного ступеня рухливості вздовж осі деталі (Рис.4).

Таким чином обробляема деталь позбавляється 5-ти ступенів свободи. Положення обробляемого пазу навкруги осі деталі не має значення.

Нерухомість оброблюємої деталі забезпечується зусиллям затиску, у поздовжньому напрямку спеціальним упором у пристрої.

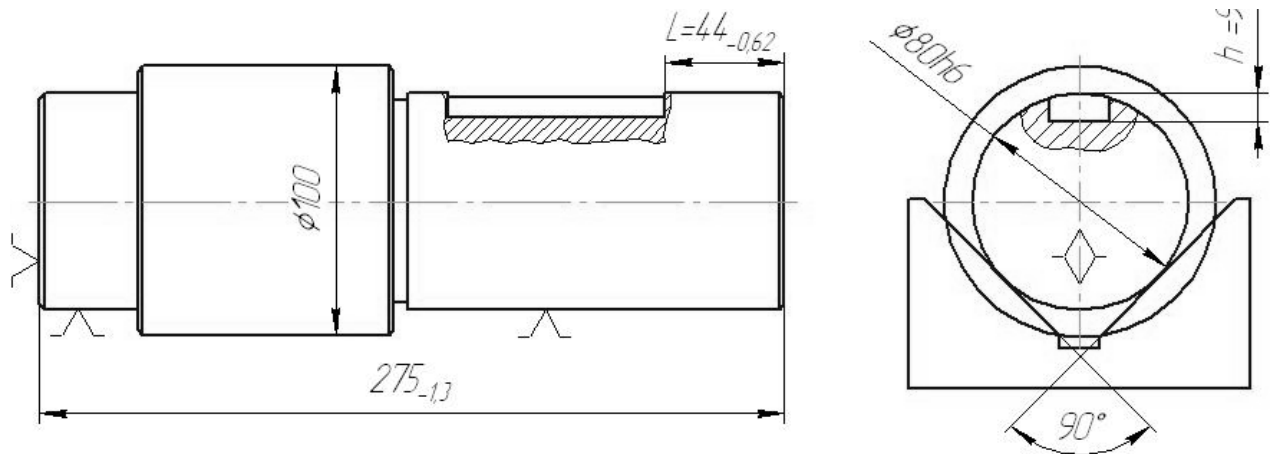


Рисунок 4.1 – Схема базування деталі що обробляється

4.4 Розрахунок погрішності базування

Для обраної схеми базування валу мають місце похибки положення шпонкового пазу у 2-х напрямках:

- 1) похибка глибини пазу $H=9^{+0.2}$;
- 2) похибка положення пазу уздовж осі деталі $L=44h14(-0.62)$.

Перша похибка буде визначатись зсувом деталі і визначається за формулою

$$\Delta \epsilon_H = 0,5 \cdot T_D \cdot (1/\sin \alpha + 1) / 2 \sin \alpha$$

де $\alpha = 45^\circ$, $T_D = -0.019$ мм - допуск на діаметр, по якому базується деталь у призмах ($D = 80h6 = 80_{-0.019}$).

$$\Delta \epsilon_H = 0,5 \cdot 0,019 \cdot (1/0,7071 + 1) / 2 \cdot 0,7071 = 0,0162 \text{ мм}$$

Допуск на глибину паза дорівнює 0.22 мм, що значно більше похибки базування.

Друга похибка буде визначатися допусками на відстань початку пазу від правого торцю і відстанню від базового(лівого) торцю до правого (вимірювальної бази). При такій схемі базування похибка базування буде дорівнювати допуску на відстань від вимірювальної бази до установчої, тобто допуском на розмір 275, який по кресленню має квалітет h14, дорівнює -1.3 мм. Це вдвічі більше допуску на відстань пазу від правого торцю. Тому треба підвищити точність загальної довжини деталі. Приймаємо для цього розміру квалітет h12 з допуском – 0.52 мм, що буде менше допуску на відстань $L=44_{-0.62}$.

4.5. Розрахунок режимів різання на операцію

Режими різання для фрезерування кінцевою фрезою шпонкового пазу на циліндричній поверхні $\varnothing 80$ розраховуємо по довіднику [7, с.73-103].

Вихідні данні для розрахунку:

- а) матеріал деталі – сталь 40Х, твердість поверхні НВ 217
- б) інструмент – кінцева фреза. Діаметр $\varnothing 22$ мм, кількість зубців $Z=5$, матеріал – швидкоріжуча сталь Р6М5
- в) глибина фрезерування $t=9$ мм (глибина шпонкового пазу)

Виконуємо розрахунок.

1) Розрахунок подачі [7, с.85].

Подача на 1 зубець фрези $S_z = 0.015$ мм/зуб при $D_{фр}=22$ мм і $t=9$ мм

Обертальна подача $S_o = S_z \cdot Z = 0.015 \cdot 5 = 0.075$ мм/об.

2) Швидкість різання V [7, с.87].

$$V = V_T \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$$

Табличне значення швидкості $V_T = 27$ м/мин при $t \leq 10$ мм і $S_z \leq 0.02$ мм/зуб

K_1 – коефіцієнт по розміру обробки. При $D_{фр} = 15$ $K_1 = 1.0$ а при $D_{фр} = 30$ $K_1 = 1.1$. Тоді при $D_{фр} = 22$ $K_1 = 1.0 + 0.1/15 = 1.007$.

$K_2 = 0.65$ при обробці сталі 40Х з твердістю НВ = 207-255 [7, с.100].

K_3 – коефіцієнт по стійкості різання. Для кінцевої фрези з швидкоріжучої сталі, діаметром 20 мм [7, с.87] стійкість $T_m = 60$ хв. Тоді $K_3 = 1.2$ [7, с.100].

Швидкість різання: $V = 27 \cdot 1.007 \cdot 0.65 \cdot 1.2 = 21.2$ м/хв.

3) Частота обертання фрези

$$n = 1000 \cdot V / (\pi \cdot D_{\text{фр}}) = 1000 \cdot 21.2 / (\pi \cdot 22) = 306.7 \text{ об/хв.}$$

Приймаємо найближчу меншу швидкість обертання шпинделю з паспорту верстата 6P12. Вона має значення : $n = 250$ об/хв.

Перераховуємо швидкість різання по прийнятій частоті обертання.

$$V = \pi \cdot D \cdot n / 1000 = \pi \cdot 22 \cdot 250 / 1000 = 17.3 \text{ м/хв.}$$

4) Потужність різання [7, с.101-103]

$$N_{\text{рез}} = E \cdot V \cdot b_{\text{max}} \cdot Z \cdot K_1 / 1000$$

У цій формулі: $E = 0.35$ при $D / t \leq 3$ ($D/t = 22/9 = 2.44$) і $S_z = 0.015$,

$b_{\text{max}} = D_{\text{фр}} = 22$ мм, $K_1 = 1.0$ при обробці сталі з HB170-229 фрезою з швидкоріжучої сталі. Тоді $N_{\text{рез}} = 0.35 \cdot 17.3 \cdot 22 \cdot 5 \cdot 1.0 / 1000 = 0.66$ кВт

5) Момент крутіння $M_{\text{кр}}$ і окружна сила різання P_z

$$M_{\text{кр}} = 9550 \cdot N_{\text{рез}} / n = 9550 \cdot 0.66 / 250 = 25.2 \text{ Нм}$$

$$P_z = 2000 \cdot M_{\text{кр}} / D_{\text{фр}} = 2000 \cdot 25.2 / 22 = 2291 \text{ Н (233.5 кгс)}$$

$$\text{Зусилля поздовжньої подачі } P_x = 0.6 \cdot P_z = 0.6 \cdot 2291 = 1374.6 \text{ Н (140.1 кгс)}$$

Таким чином режими різання розраховані і використовуємо їх значення при подальшому розрахунку пристрою.

4.6. Розрахунок сил затиску з урахуванням сил, діючих у пристрої

При виконанні фрезерування шпонкового пазу кінцевою фрезою на заготовлю діють 2 сили: сила різання P_z і сила подачі P_x . При цьому сила P_z прикладена на діаметрі фрези, який дорівнює 22 мм, і її напрям змінюється. Розглядаємо варіант, коли сила P_z діє перпендикулярно осі обертання заготовлі і може прокручувати заготовлю навколо її осі обертання. Сила P_x діє паралельно осі заготовлі, але заготовля спирається на упор, який утримує її в цьому напрямі. Нерухомість заготовлі буде забезпечуватись силами тертя між заготовлею і базовими поверхнями призм, які повинні надаватись зусиллям затиску.

Розрахункова схема наведена на рис. 5, де показані усі діючі у пристрої сили

при фрезеруванні шпонкового пазу.

Вихідні дані: $P_z = 2.3 \text{ kN}$ - сила різання, $P_x = 0.6P_z = 1.38 \text{ kN}$ - сила подачі, $L = 160 \text{ мм}$ - відстань між опорами важеля затиску, $l = 70 \text{ мм}$ - відстань від крапки прикладення сили затиску до осі гайки механізму затиску, $d = 80 \text{ мм}$ - діаметр поверхонь заготівлі у контакті з призмами, $D = 100 \text{ мм}$ - діаметр заготівлі у крапці прикладення сили затиску, $h = 9 \text{ мм}$ - глибина фрезерування, $f = 0.15$ - коефіцієнт тертя деталі з призмами, $f_z = 0.7$ – коефіцієнт тертя між важелем з рифленням і деталлю, K - коефіцієнт надійності затиску заготівлі.

Коефіцієнт надійності затиску обчислюємо за методом, наведеним у [10, стр.381-382]:

$$K = K_0 \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6$$

Де:

$K_0 = 1.5$ – гарантований коефіцієнт запасу;

K_1 – залежить від виду поверхні заготівлі. При обробленій поверхні $K_1 = 1.0$;

K_2 - коефіцієнт, який залежить від затуплення ріжучого інструменту. При фрезеруванні кінцевою фрезою $K_2 = 1.2$.

K_3 – коефіцієнт від переривчастого різання. При не переривчастому різанні $K_3 = 1.0$.

K_4 – коефіцієнт, який залежить від постійності сили затиску. При немеханізованому (ручному) затиску, що застосовано у нас $K_4 = 1.3$;

K_5 – залежить від зручності розташування рукоятки затиску і кута її повороту. При повороті рукоятки більше 90° $K_5 = 1.2$;

K_6 – коефіцієнт, який урахується тільки при встановленні заготівлі на плоску поверхню. В нас заготівля встановлюється на циліндричну поверхню, тому $K_6 = 1.0$.

Таким чином $K = 1.5 \cdot 1.0 \cdot 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.3 \cdot 1.2 \cdot 1.0 = 2.808$

Розраховуємо силу затиску, діючу на обробляему деталь P_s і силу, яку повинна надавати гайка P_g . При цьому розглядаємо тільки можливість обертання заготівлі від сили P_z ;

Для розрахунку зусиль затиску записуємо вираз для визначення реакції у опорах заготівлі на призмах R від сили затиску P_3 . Їх буде дві у крапках контакту заготівлі з призмою. $R = P_3 / \sqrt{2}$

Тоді зусилля затиску P_3 :

$$P_3 = \frac{P_z \cdot (d - h) / 2}{f \cdot d / \sqrt{2} + f_z \cdot D / 2} \cdot K = \frac{2.3 \cdot (80 - 9) / 2}{0.15 \cdot 80 / \sqrt{2} + 0.7 \cdot 100 / 2} \cdot 2.808 = 4.95 \cdot \text{êÍ}$$

Розраховуємо силу, яку повинна надавати гайка P_g для необхідної сили затиску P_3

$$P_g = P_3 \cdot L / (L - l) = 4.95 \cdot 160 / (160 - 70) = 8.8 \cdot \text{êÍ}$$

У проєктованому пристрої у механізмі затиску використано гайку M16 з кроком $t=2.0$ мм.

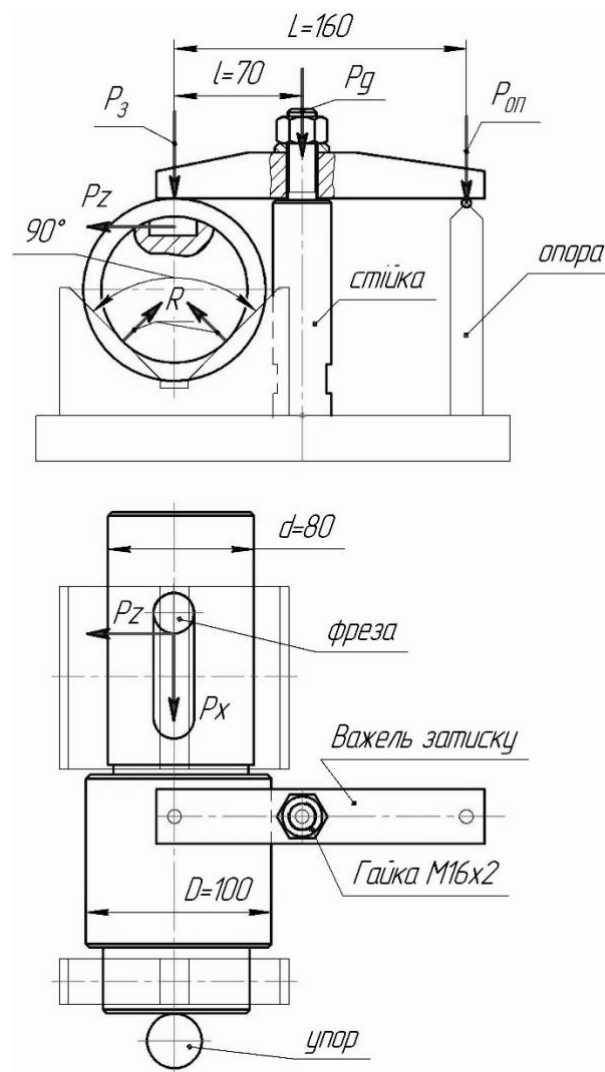


Рисунок 4.2 – Розрахункова схема пристрою

4.7. Вибір типу та розрахунок основних параметрів приводу затискного механізму

Як затискний механізм прийнято гвинтова (різьбова) пара. Затиск виконується обертанням гайки ключем з притисканням важеля до встановленої заготівлі.

Визначаємо крутильний момент, який повинен прикладатись до гайки M_g для забезпечення необхідної сили P_g . Цей момент буде діяти на середньому діаметрі різьби гайки, який дорівнює $d_{sr}=14,701$ мм.

Момент обчислюємо з урахуванням тертя у різьбі і у контакті торцю гайки з шайбою на важелі [10, табл. 5, с.388] за виразом:.

$$M_g = P_g \cdot \left[(0.5 \cdot d_{sr} \cdot \operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{pr}) + \frac{f \cdot (D_{nt}^3 - d_{vt}^3)}{3 \cdot (D_{nt}^2 - d_{vt}^2)} \right]$$

Де $\alpha=30^\circ$ – половина кута при вершині різьби, $\varphi_{pr} = 6.7^\circ$ – приведений кут тертя у різьбі, $f = 0.15$ – коефіцієнт тертя гайки з шайбою на важелі, $D_{nt} = 22.5$ мм – зовнішній діаметр, а $d_{vt} = 14.38$ мм – внутрішній діаметр контакту гайки з шайбою на важелі. Тоді

$$M_g = 8.8 \cdot \left[(0.5 \cdot 14.7 \cdot \operatorname{tg}(30 + 6.7) + \frac{0.15 \cdot (22.5^3 - 14.38^3)}{3 \cdot (22.5^2 - 14.38^2)} \right] = 22.871 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Цей момент буде забезпечуватись прикладанням зусилля на гайковому ключі, який буде обертатись вручну при затиску заготівлі після її встановлення на призми у пристрої P_{kl} мм. Це зусилля залежить від довжини ключа L_{kl} , яка за ДСТ 2841-80 дорівнює 215 мм.

$$P_{kl} = M_g / L_{kl} = 22.871 / 215 = 0.106 \text{ кН} = 10,4 \text{ кгс}$$

Таким чином для забезпечення необхідної сили затиску необхідно прикласти до ключа зусилля $P_{kl}=10.4$ кгс, що не важко робити.

Перевіряємо наявність самогальмування гвинтового механізму по КПД різьбової пари η [10, табл.5, с. 388-389].

$$\eta = \frac{\operatorname{tg}(\alpha)}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi_{pr}) + \frac{2}{3} \cdot \frac{f \cdot (Dnt^3 - dvt^3)}{(Dnt^2 - dvt^2) \cdot d_{sr}}} = \frac{\operatorname{tg}(1.82)}{\operatorname{tg}(1.82 + 6.67) + \frac{2}{3} \cdot \frac{0.15 \cdot (22.5^3 - 14.38^3)}{(22.5^2 - 14.38^2) \cdot 15.025}} = 0.094$$

Механізм затиску надійний від само відгвинчування при $\eta < 0.4$. В нас ця умова дотримується.

4.8. Розрахунок деталей пристосування на міцність

Найбільш навантаженою деталлю у проектованому пристосуванні буде важіль затиску заготівлі до базових призм, тому виконуємо перевірку на міцність саме його. Як розрахункову схему використовуємо схему дії сил у пристосуванні, наведену на рис.5.

Цей важіль є балкою на двох опорах, яка навантажена між опорами силою P_g , а у опорах - на стійку з правою сторони і на заготівлю силою P_3 , а з лівої силою $P_{оп}$, як реакції у них.

Найбільш небезпечним січенням важеля буде січення у крапці дії сили P_g . Згинальний момент у цьому січенні буде найбільшим. На рис.6 наведена епюра згинальних моментів.

Вихідні дані для розрахунку: P_g - сила від закручування гайки, L - відстань між опорами балки, l - відстань від сили P_g до крапки затиску заготівлі. Небезпечне січення має форму прямокутника з вирізом посередині (отвір під різьбу М16). Його розміри: B - ширина, h - вишина, отвір посередині діаметром d_o .

$$P_g = 8.8 \text{ кН}, \quad L = 160 \text{ мм}, \quad l = 70 \text{ мм}, \quad B = 50 \text{ мм}, \\ h = 25 \text{ мм}, \quad d_o = 16.2 \text{ мм}$$

Реакція у лівій опорі $P_{оп}$ буде дорівнювати

$$P_{оп} = P_g \cdot l / L = 8.8 \cdot 70 / 160 = 3.85 \text{ кН}$$

Згинальний момент у небезпечному січенні буде дорівнювати

$$M_{iz} = P_3 \cdot l = P_{оп} \cdot (L - l) = 4.95 \cdot 70 = 346.5 \text{ кН} \cdot \text{мм}$$

Розраховуємо момент опору січення - W , вираз для якого [9, с.69, табл.11] має вигляд

$$W = h^2 \cdot (B - d_0) / 6 = 25^2 \cdot (50 - 16.2) / 6 = 3520.83 \text{ мм}^3$$

Тоді напруга згинання $\sigma_{\text{и}}$ у цьому січенні буде

$$\sigma_{\text{и}} = 1000 \cdot M_{\text{из}} / W$$

$$\sigma_{\text{и}} = 1000 \cdot 346.5 / 3520.83 = 98.414 \text{ Н/мм}^2 \text{ (МПа)}$$

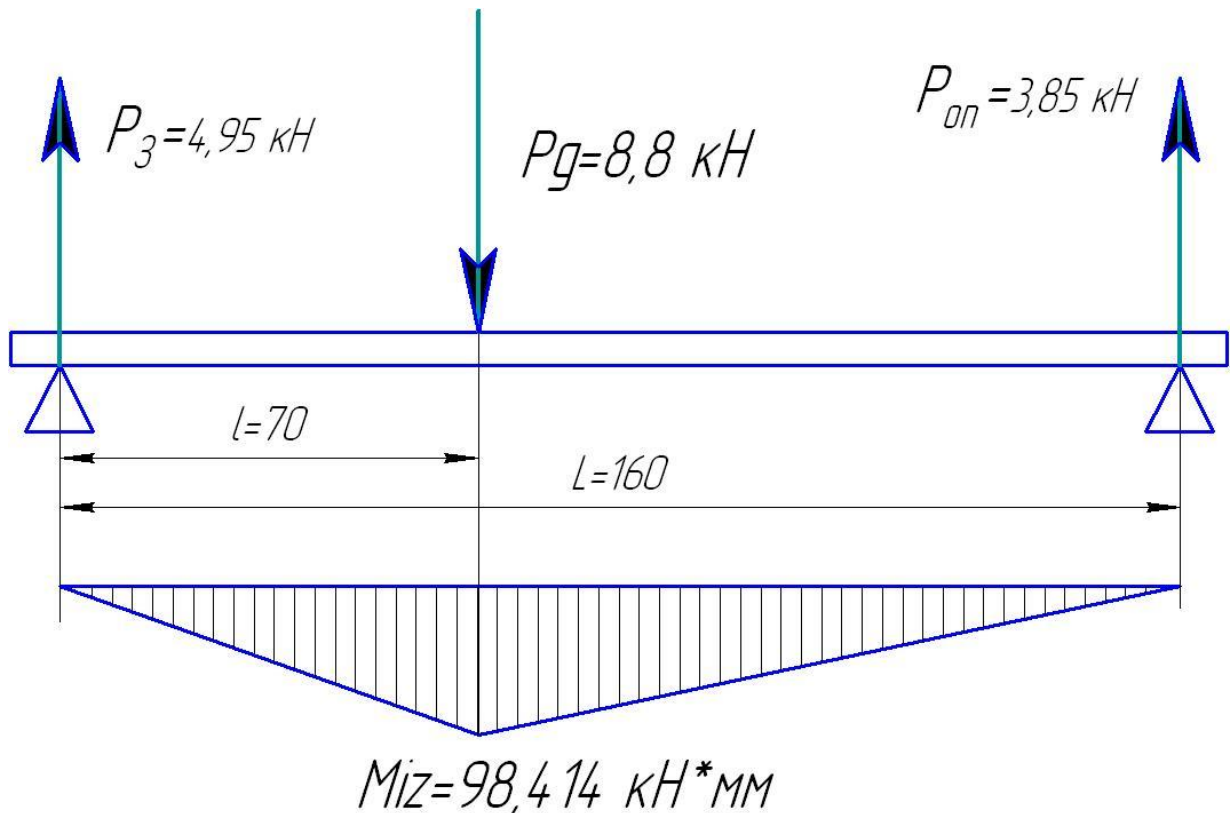


Рисунок 4.3 – Побудова епюри згинальних моментів

Важіль затиску виконаний з сталі 45 із загартуванням до HRC 30-40. При цьому припустима напруга згинання $[\sigma_{\text{и}}]$ буде дорівнювати $[\sigma_{\text{и}}] = 360 \text{ МПа}$ [9, с.62, табл.14].

Таким чином важіль затиску проходить на міцність:

$$\sigma_{\text{и}} = 98.414 < [\sigma_{\text{и}}] = 360.$$

4.9. Опис конструкції та роботи пристрою

Пристрій спроектовано для обробки деталі на вертикально-фрезерному верстаті моделі 6Р12.

Застосування даного пристрою (рис.7) забезпечує точну й швидку установку всіх оброблюваних деталей при закріпленні в пристрою.

Пристрій складається з наступних елементів:

- настановні елементи призначені для додання заготівлі строго певного положення щодо різального інструменту. У цьому випадку настановними елементами будуть дві призми з кутом 90° поз. 4 і як упор для торця постійна опора поз. 5.

- Затискні елементи призначені для запобігання зсуву заготівлі під дією сили різання або власної ваги. Як затискний елемент приймаємо ручний різбовий пересувний (відвідний) важіль затиску поз. 6.

Всі елементи пристрою розміщені на його корпусі (основі), що має вид плити поз. 1. Корпус має два вушка, поз. 2, для кріплення на столі верстата.

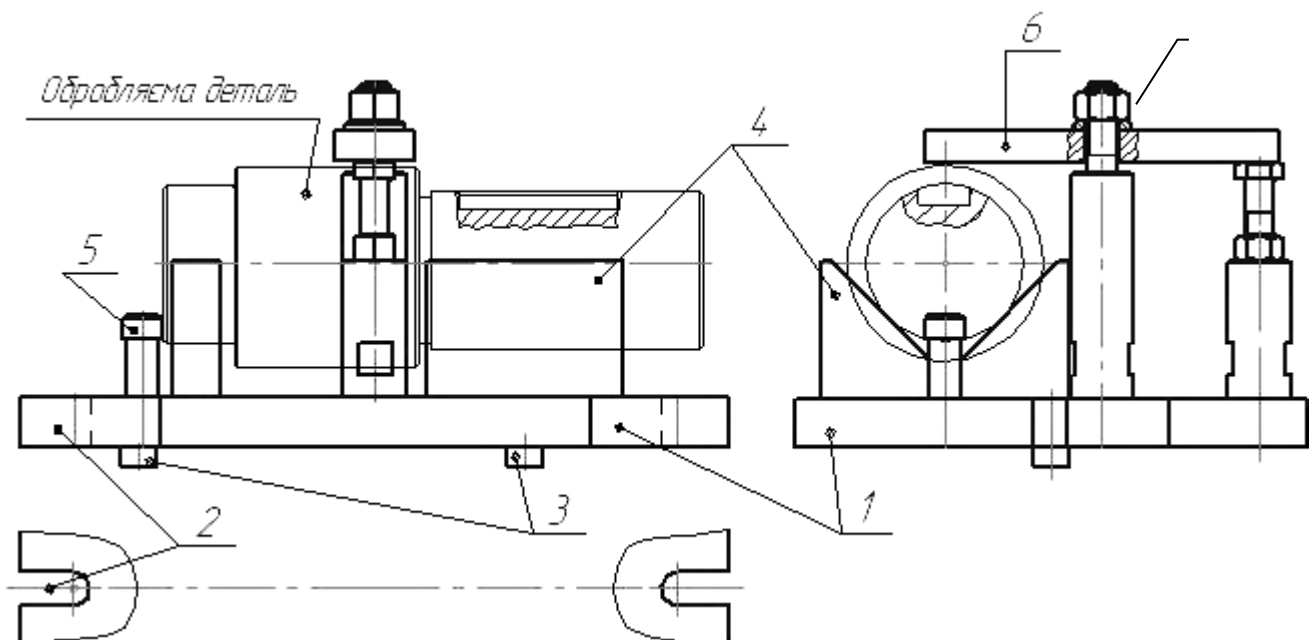


Рисунок 4.4 – Ескіз пристрою для фрезерування

Для швидкої й точної установки пристрою на столі верстата, на нижній

частині його розміщуються дві круглі шпонки поз.3.

Принцип роботи пристрою: після установки й закріплення пристрою на столі верстата, деталь, що підлягає обробці, установлюється на дві призми й доводиться до упору в торець. Після чого затискається ручним різьбовим затискачем обертанням затискної гайки (поз. 7). При цьому важіль затиску 6, опираючись з правої сторони на болт опори, з лівої сторони прижимає заготівлю до призми

4.10. Розробка технічних вимог до пристрою

Склад технічних вимог і методика їх розробки на які завгодно вироби регламентуються і наведені у ДСТ 2.114-95 системи ЕСКД. Згідно з цим стандартом у технічних вимогах до виробу (пристрою) повинні бути наведені вимоги і норми, які визначають показники якості та експлуатаційні характеристики виробу.

Розробляємо технічні вимоги до проектного пристрою згідно з цим стандартом.

ТЕХНІЧНІ ВИМОГИ

Пристрій повинен відповідати вимогам даних технічних умов та комплекту документації згідно з кресленням ВІТ-ВВ-318.5.05050303СК

1) Основні параметри і характеристики пристрою.

Пристрій призначений для встановлення і закріплення деталі “Валик” на столі вертикально-фрезерувального верстата для фрезерування у ній шпонкового пазу кінцевою фрезою діаметром 22 мм.

Маса пристрою дорівнює 26 кг.

Габарити (L x B x H, мм) = 360 x 260 x 193.

Відстань від осі шпинделю верстата з встановленою фрезою до найближчої до робочого місця кромки пристрою – 154 мм і не заважатимете робітнику.

2) Вимоги до матеріалів

Матеріали кожної деталі пристрою та їх потрібні властивості вказані на їх робочих кресленнях ВІТ-ВВ-318.5.05050303.001 – 009 у його деталеровці і повинні відповідати їм.

3) Комплектність

У комплект пристрою, крім його самого, входить:

- ключ гайковий 7811-0125 за ДСТ 2841-80 з розміром під гайку $s=24$ мм і довжиною 215 мм.

- данні технічні вимоги до пристрою.

4) Інструкція по встановленню пристрою на верстаті і роботі з ним.

Пристрій встановлюється на столі верстата і орієнтується на ньому двома циліндричними шпонками у середній Т – образний паз (див. складальне креслення пристрою ВІТ-ВВ-318.5.05050303СК). Потім закріплюється на столі двома болтами за ДСТ 13152-67 (для Т – образних пазів верстатів).

Встановлення деталі у пристрій і її закріплення виконується у наступній послідовності:

- важіль затиску повертається навкруги осі стойки, щоб він не був паралельним повздовжній подачі верстата;

- деталь встановлюється на дві призми, доводиться до торкання лівим торцем до упору;

- важіль затиску повертається навкруги осі стойки таким чином, щоб він опирався одним кінцем на деталь, а другим на болт опори;

- виконується затиск деталі що обробляється у пристрої. При цьому затискна гайка обертається ключем спочатку до торкання важеля затиску до деталі, а потім робиться один неповний оберт ключа з гайкою для затиску.

- після закінчення обробки і повертання столу верстата в вихідне положення виконується розтиск і зняття деталі у порядку зворотному попереднім діям (діям при встановленні і затиску).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломному проєкті було розроблено та досліджено швидкопереналагоджуваний патрон для токарного верстата з числовим програмним керуванням. Об'єктом дослідження виступає затискний патрон як елемент технологічного оснащення, що визначає точність базування заготовок, продуктивність обладнання та безпеку роботи. Метою роботи було підвищення ефективності використання токарних верстатів з ЧПК шляхом скорочення часу переналагодження, поліпшення точності та стабільності затиску заготовок і підвищення надійності роботи вузла без суттєвого ускладнення конструкції.

У процесі виконання роботи проаналізовано сучасні конструкції універсальних, спеціальних і швидкодіючих патронів, їх класифікацію, область застосування та основні експлуатаційні показники. Встановлено, що традиційні трикулачкові самоцентруючі патрони забезпечують достатню універсальність, але не відповідають вимогам до швидкого переналагодження та інтеграції у системи ЧПК. Виявлено ключові недоліки прототипів: значні витрати часу на заміну кулачків, підвищені контактні напруження й деформації тонкостінних заготовок, обмеження за допустимими обертами через дисбаланс і відсутність вбудованого моніторингу стану вузла. На основі проведеного аналізу обґрунтовано необхідність створення швидкопереналагоджуваного патрона касетного типу, сумісного з існуючими шпиндельними вузлами.

У другому розділі розроблено конструкцію патрона, сформовано його кінематичну схему та виконано основні розрахунки. Запропоновано використання касет зі швидкозмінними кулачками, що дозволяє здійснювати переналагодження переважно за рахунок заміни попередньо налаштованих касет, а не тривалої ручної перестановки кулачків. Виконано силові та міцнісні розрахунки основних деталей, обґрунтовано вибір матеріалів і термообробки, визначено раціональні допуски й посадки. Розглянуто питання балансування патрона й забезпечення роботи в режимах підвищених обертів. У результаті отримано технічно цілісну конструкцію, придатну до виготовлення та

експлуатації.

У третьому розділі проаналізовано способи підвищення експлуатаційних характеристик розробленого патрона. Показано, що впровадження принципів SMED і швидкозмінного оснащення дає змогу суттєво скоротити внутрішній час переналагодження за рахунок винесення частини операцій у розряд зовнішніх і стандартизації послідовності дій оператора. Оптимізовано профіль кулачків та характер контактної плями, що дозволило зменшити локальні контактні напруження й деформації тонкостінних деталей, підвищити повторюваність базування й знизити радіальне биття. Обґрунтовано вибір мастильних матеріалів і схеми герметизації, сформовано регламент обслуговування, завдяки чому забезпечується стабільність зусилля затиску та збільшується ресурс вузла. Запропоновано варіант інтеграції в патрон датчиків тиску, положення та вібрацій з передаванням сигналів у систему ЧПК, що дає змогу здійснювати оперативний контроль стану вузла й блокувати небезпечні режими.

Порівняння основних показників прототипу та розробленого швидкопереналагоджуваного патрона показало помітне покращення експлуатаційних характеристик. Узагальнені результати наведені в таблиці.

Порівняння основних показників прототипу та розробленого патрона

Параметр	Прототип	Розроблений патрон	Характер зміни
Час переналагодження	більший ($\approx 5-7$ хв)	менший (приблизно в 2 рази)	скорочення часу
Допустима частота обертання	обмежена	підвищена	покращення роботи на високих обертах
Радіальне й осьове биття	стандартний рівень	зменшене	підвищення точності
Стан тонкостінних заготовок	помітні деформації	зменшені деформації	щадний затиск
Наявність датчиків і моніторингу	відсутні	передбачені датчики тиску, положення, вібрацій	можливість діагностики та інтеграції з ЧПК
Зручність і безпека експлуатації	залежить від досвіду оператора	підвищена за рахунок ергономіки й автоматичного контролю	покращені умови праці

З наведеного порівняння видно, що розроблений патрон забезпечує скорочення часу переналагодження орієнтовно вдвічі, підвищує допустиму частоту обертання, зменшує деформацію тонкостінних деталей і покращує точність базування. Вбудовані засоби моніторингу дозволяють інтегрувати вузол у систему керування верстата й своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи, що позитивно впливає на загальну надійність технологічного комплексу.

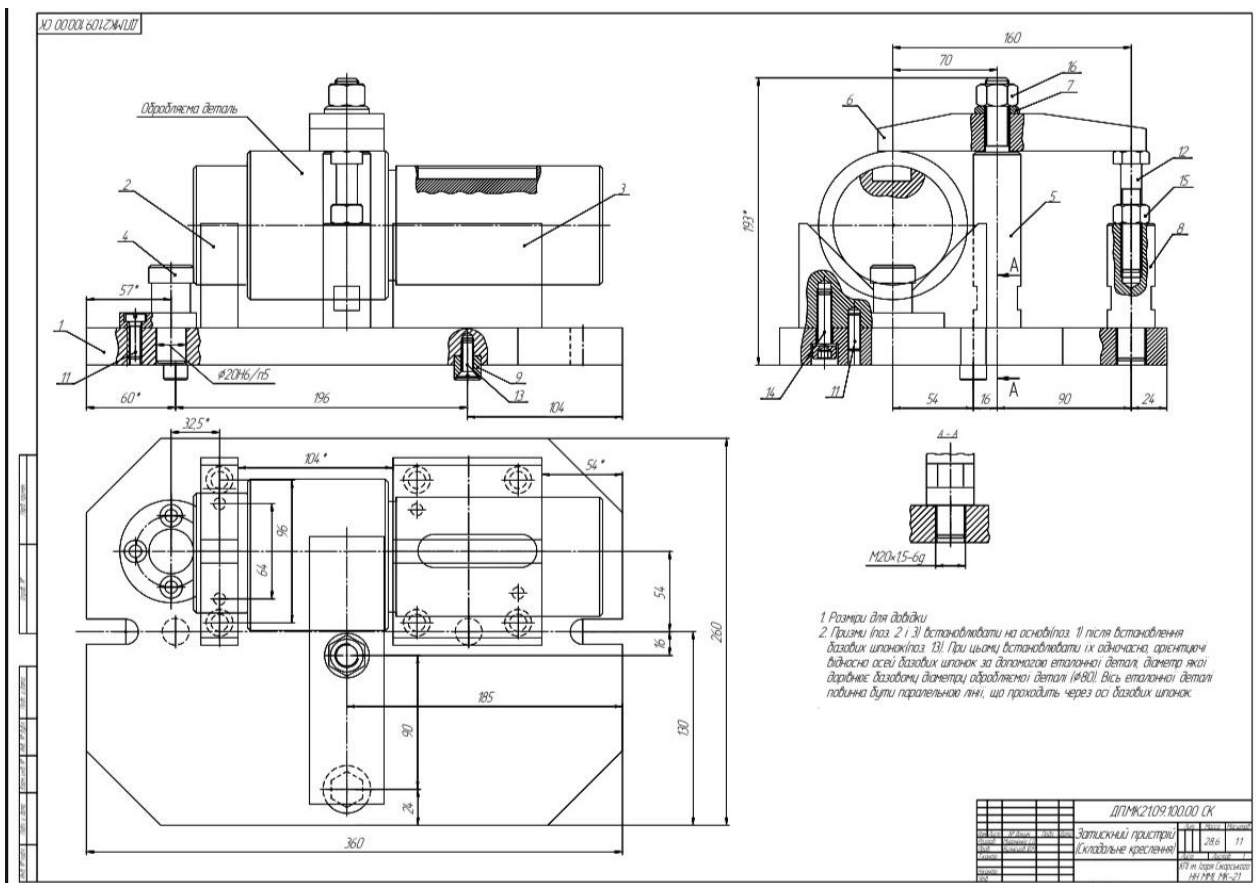
Науково-технічна новизна роботи полягає в комплексному поєднанні ряду рішень у межах однієї конструкції патрона. До таких рішень належать застосування принципів SMED і касетного швидкозмінного оснащення для скорочення часу переналагодження, оптимізація профілю кулачків із урахуванням розподілу контактних напружень і деформацій заготовки, реалізація заходів із балансування та приглушення вібрацій, використання раціонально підібраних мастил і герметизації для підвищення ресурсу, а також інтеграція датчиків тиску, положення й вібрацій у контур керування верстата. Сукупність цих рішень дозволяє розглядати розроблений патрон як елемент «розумного» технологічного оснащення, орієнтованого на сучасні вимоги автоматизованого виробництва.

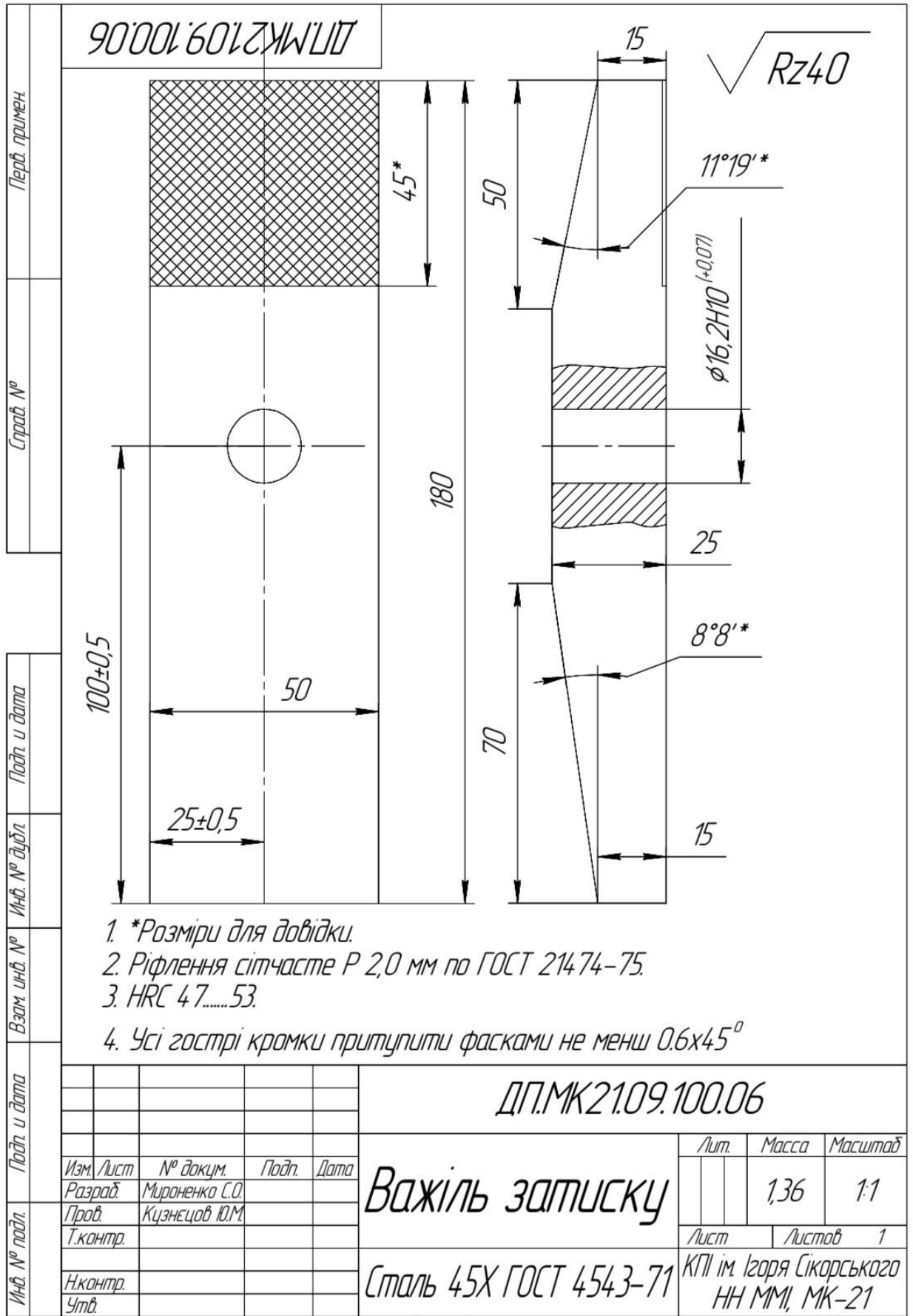
Практичне значення роботи полягає в тому, що запропонований швидкопереналагоджуваний патрон може бути впроваджений на ділянках серійного та дрібносерійного виробництва для скорочення витрат часу на переналагодження й підвищення стабільності якості обробки. Розрахункова оцінка економічної ефективності показала, що за типових для машинобудівного підприємства умов впровадження декількох таких патронів забезпечує річну економію машинного часу, еквівалентну значному грошовому ефекту, при цьому строк окупності капітальних витрат становить менше одного року. Таким чином, розроблений швидкопереналагоджуваний патрон є технічно обґрунтованим і економічно доцільним рішенням для підвищення ефективності роботи токарних верстатів з ЧПК.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Richter A. Quick-change-jaw systems for chucks offer multiple benefits // Cutting Tool Engineering Magazine. – 2017. – URL: <https://www.ctemag.com/articles/quick-change-jaw-systems-chucks-offer-multiple-benefits>.
2. Quick-Change Chucks Offer More than Fast Jaw Changes// Modern Machine Shop. – 2012. – URL: <https://www.mmsonline.com/articles/quick-change-chucks-offer-more-than-fast-jaw-changes->.
3. Quick-Change Workholding System Increases Productivity// Modern Machine Shop. – 2020. – URL: <https://www.mmsonline.com>.
4. Zhao X., Cui X., Hu Z. Development of an End-Toothed Disc-Based Quick-Change Fixture for Ultra-Precision Diamond Turning // Machines. – 2021. – Vol. 9(11). – DOI: 10.3390/machines9110257.
5. Tapas V., Pawar P., Chavan M. Reducing Machine Setup Time Using Simultaneously Four- and Three-Jaw Chucks // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3021. – DOI: 10.1063/5.0221468.
6. Kitagawa Europe. QJR Series Quick Jaw Replacement Chucks: Product Catalogue.– Leeds, 2024. – URL: <https://kitagawaeurope.com>.
7. SCHUNK GmbH & Co. KG. ROTA THW3 – Power Lathe Chuck with Jaw Quick-Change System.– Lauffen/Neckar, 2024. – URL: <https://schunk.com>.
8. SMW-AUTOBLOK. Quick Jaw Change Power Chucks – KNCS/NB/2G Series Catalogue.– Meckenbeuren, 2023. – URL: <https://www.smw-autoblok.com>.
9. RÖHM GmbH. Key Bar Chucks with Quick Jaw Change System.– Sontheim, 2023. – URL: <https://www.roehm.biz>.
10. ISO 3442-3:2007. Machine tools – Dimensions and geometric tests for self-centring chucks with two-piece jaws. Part 3: Power-operated chucks with serrated jaws.– Geneva: ISO, 2007. – 24 p.

11. ISO 702-3:2007. Machine tools – Connecting dimensions of spindle noses and workholding chucks – Part 3: Bayonet type.– Geneva: ISO, 2007. – 16 p.
12. ISO 702-1:2009. Machine tools – Connecting dimensions of spindle noses and workholding chucks – Part 1: Conical connection.– Geneva: ISO, 2009. – 18 p.





Крипиченко

Філіппов А.А.

